UNIWERSYTET WARMIŃSKO-MAZURSKI W OLSZTYNIE
WYDZIAŁ ROLNICTWA I LEŚNICTWA

WYDZIAŁ ROLNICTWA I LEŚNICTWA

Dziedzina nauk rolniczych

Dyscyplina rolnictwo i ogrodnictwo

mgr inż. Paweł Dudziec

Rozprawa doktorska

Produkcja i wielokierunkowe wykorzystanie konopi siewnych *Cannabis sativa* L.

Production and multidirectional use of hemp *Cannabis sativa* L.

Praca wykonana w Katedrze Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców

Promotor: prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski,
Katedra Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców, Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Kazimierz Warmiński, prof. UWM
Katedra Chemii, Wydział Rolnictwa i Leśnictwa

Olsztyn, 2026

Spis treści

Spis fotografii, rysunków i tabel 4

Lista publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej 9

Streszczenie 10

Abstract 11

1. Wprowadzenie 12

2. Przedmiot badań, hipotezy badawcze oraz cele rozprawy doktorskiej 18

3. Materiały i metody 21

3.1. Doświadczenie polowe 21

3.2. Określenie plonu, pomiary biometryczne i obserwacje fenologiczne 28

3.3. Analizy laboratoryjne 30

3.4. Analizy wskaźników efektywności energetycznej 32

3.5. Analizy statystyczne 35

4. Wyniki i dyskusja 37

4.1. Źródła olejków eterycznych 37

4.1.1. Kwiaty 37

4.1.2. Biokoncentrat 42

4.2. Biometria oraz obserwacje fenologiczne 48

4.3. Plon i wilgotność biomasy 55

4.4. Plon całkowity 58

4.4.1. Profile odmian 64

4.5. Predykcja kannabidiolu i tetrahydrokannabinolu 68

4.6. Zróżnicowanie składu i właściwości łodyg 71

4.6.1. Skład przybliżony 72

4.6.2. Skład elementarny 76

4.6.3. Właściwości energetyczne 79

4.6.4. Skład lignocelulozowy i zawartość ekstraktów 80

4.6.5. Profile odmian 84
4.6.6. Efekt interakcji 87
4.7. Ogólna charakterystyka składu i właściwości łodyg 90
4.8. Skład i właściwości stałej pozostałości po hydrodestylacji 92
4.8.1. Skład przybliżony 92
4.8.2. Skład elementarny 95
4.8.3. Właściwości energetyczne 99
4.8.4. Skład lignocelulozowy i zawartość ekstraktów 100
4.8.5. Profile odmian 105
4.8.6. Potencjalne procesy konwersji oraz strategie wstępnej obróbki 106
4.9. Efektywność energetyczna produkcji łodyg i biomasy wegetatywnej 108
4.9.1. Plon oraz jego wartość energetyczna 108
4.9.2. Nakłady energetyczne 115
4.9.3. Uzysk energii 117
4.9.4. Energochłonność 119
4.9.5. Wskaźnik efektywności energetycznej 123
5. Wnioski 126
6. Literatura 129
7. Oświadczenia 155
8. Załączniki 170
8.1. Tabele Z1−Z5 170
8.2. Publikacja: Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp 174
8.3. Publikacja: Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest 213
8.4. Publikacja: Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity 246
8.5. Publikacja: Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest 259

Spis fotografii, rysunków i tabel

Spis fotografii

Fotografia 1. Pozyskane z uprawy konopi włóknistych źródła olejków eterycznych – kwiat w okresie kwitnienia oraz świeży biokoncentrat (przed suszeniem i odseparowaniem nasion); 2025 rok. 43

Fotografia 2. Fragment doświadczenia w roku 2023 (23 sierpnia; widoczne kolejno od lewej siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Santhica 70, Kompolti, Henola, Santhica 27, Finola, Białobrzeskie, Earlina 8 fc). 50

Fotografia 3. Fragment doświadczenia w roku 2024 (12 lipca; widoczne kolejno od lewej pierwsze siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Kompolti, Earlina 8fc, Finola, Santhica 70). 50

Fotografia 4. Fragment doświadczenia w roku 2025 (10 września; widoczne kolejno od lewej siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Kompolti, Earlina 8fc, Finola, Santhica 70). 51

Fotografia 5. Rozwój pędów bocznych i kwiatostanów po zbiorze kwiatów, prowadzący do wytworzenia nasion. Miejsca po cięciu kwiatów/wiech zaznaczono czerwonymi okręgami. 59

Fotografia 6. Dzwońce *Chloris chloris* żerujące na konopiach włóknistych (2025 rok). 64

Fotografia 7. Jery *Fringilla montifringilla* żerujące na konopiach włóknistych (2023 rok). 64

Fotografia 8. Podsadki i znamiona słupków w kolejnych fazach fenologicznych (od lewej do prawej: kwitnienie, późne kwitnienie, dojrzewanie nasion). 70

Spis rysunków

Rysunek 1. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2023 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian. 26

Rysunek 2. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2024 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę

powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian. 27

Rysunek 3. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2025 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian. 28

Rysunek 4. Mapa cieplna współczynników korelacji Pearsona dla plonu całkowitego konopi oraz cech biometrycznych. 65

Rysunek 5. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa między przypadkami interakcji odmiana × zbiór kwiatów (przyrostek „H" oznacza obiekty ze zbiorem kwiatów; jego brak – obiekty bez zbioru kwiatów). D – odległość wiązania; D_{max} – maksymalna odległość wiązania. 66

Rysunek 6. Analiza PCA podsumowująca zależności między cechami plonu oraz różnice między kombinacjami odmiana × zbiór kwiatów. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji. W dolnym zaprezentowano wykres wyników dla odmiana × zbiór kwiatów (B – Białobrzeskie, H – Henola, S27 – Santhica 27, S70 – Santhica 70, E – Earlina 8fc, K – Kompolti, F – Finola; przyrostek „_H" oznacza obiekty ze zbiorem kwiatów, a jego brak – obiekty bez zbioru kwiatów). 68

Rysunek 7. Mapa cieplna przedstawiająca procentowy udział głównych czynników (odmiany, zbioru kwiatów i roku) oraz ich interakcji w całkowitej wariancji plonu konopi i cech biometrycznych. Intensywność barwy wzrasta wraz z wielkością efektu. „Reszta" oznacza wariancję niewyjaśnioną..... 69

Rysunek 8. Trójwymiarowy wykres rozrzutu parametrów analizy przybliżonej (W, VM, FC i A) oraz ciepła spalania (HHV) łodyg konopi. Wielkość punktów reprezentuje A (% s.m.), natomiast kolor punktów (skala szarości) wskazuje HHV (MJ kg^{-1} s.m.). Etykiety oznaczają odmiany (B – Białobrzeskie, H – Henola, S27 – Santhica 27, S70 – Santhica 70, E – Earlina 8fc, K – Kompolti oraz F – Finola). 74

Rysunek 9. Standaryzowany profil analizy elementarnej (C, H, S, N i Cl) łodyg konopi w przekroju odmian. Wartości dodatnie i ujemne wskazują odpowiednio poziomy powyżej i poniżej średniej względem całego zbioru danych. Różne litery obok punktów oznaczają statystycznie istotne różnice między

odmianami w obrębie danego pierwiastka (test Tukeya, $p < 0,05$). Linie łączące punkty przedstawiono wyłącznie jako pomoc wizualną i nie oznaczają ciągłości między zmiennymi. 80

Rysunek 10. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa łodyg konopi. Pionowa czerwona linia oznacza kryterium Sneatha – 0,66 D_{max} i 0,33 D_{max}. D – odległość wiązania; D_{max} – maksymalna odległość wiązania. 86

Rysunek 11. Analiza głównych składowych (PCA) podsumowująca zależności między cechami jakości łodyg oraz różnice między odmianami. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji PCA (ładunki czynnikowe) dla analizowanych zmiennych; długość wektorów odzwierciedla jakość reprezentacji na płaszczyźnie PC1–PC2, a kąty między wektorami wskazują na korelacje. W dolnym panelu zaprezentowano wykres wyników PCA dla odmian. .. 87

Rysunek 12. Mapa cieplna przedstawiająca procentowy udział głównych czynników (odmiany, zbioru kwiatów i roku) oraz ich interakcji w całkowitej wariancji cech łodyg. Intensywność barwy wzrasta wraz z wielkością efektu. „Reszta" oznacza wariancję niewyjaśnioną..... 89

Rysunek 13. Analiza PCA podsumowująca zależności między cechami jakości łodyg oraz różnice między kombinacjami odmiana × rok. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji PCA (ładunki czynnikowe), a w dolnym wyniki dla kombinacji odmiana × rok (B×23…F×25), z ręcznie dodanymi okręgami ułatwiającymi wizualną identyfikację tendencji do grupowania. 90

Rysunek 14. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa stałych pozostałości po hydrodestylacji. Pionowa czerwona linia oznacza kryterium Sneatha – 0,66 Dmax i 0,33 Dmax. D – odległość wiązania; Dmax – maksymalna odległość wiązania. 107

Rysunek 15. Średni uzysk energii z produkcji łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku... 119

Rysunek 16. Wykresy skrzypcowe energochłonności produkcji łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych..... 122

Rysunek 17. Średni wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków z łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku..... 125

Spis tabel

Tabela 1. Charakterystyka stanowiska glebowego. 22

Tabela 2. Dane dotyczące odmian konopi włóknistych na podstawie krajowych rejestrów odmian roślin uprawnych (Polska: COBORU; Francja: GEVES; Węgry: NÉBIH; Finlandia: Ruokavirasto). 23

Tabela 3. Charakterystyka materiału siewnego (wartości średnie dla lat 2023−2025). 24

Tabela 4. Warunki wodno-termiczne podczas wegetacji konopi w kolejnych latach scharakteryzowane za pomocą współczynnika hydrotermicznego Sielianinowa*. 25

Tabela 5. Warunki meteorologiczne (suma opadów w mm | średnia temperatura powietrza w °C) w sezonach wegetacyjnych (od terminu siewu wszystkich odmian do zbioru ostatniej odmiany)*. 25

Tabela 6. Terminy zbioru poszczególnych odmian konopi włóknistych w sezonach wegetacyjnych 2023, 2024 i 2025. Liczby w nawiasach oznaczają liczbę dni od wysiewu w danym roku. 31

Tabela 7. Dane dotyczące etapów produkcji konopi włóknistych w latach prowadzenia doświadczenia. 35

Tabela 8. Charakterystyka kwiatów w zależności od odmiany, roku oraz interakcji odmiana × rok. 39

Tabela 9. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych źródeł zmienności (w tym interakcji) oraz cech. 44

Tabela 10. Charakterystyka biokoncentratu w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok. 46

Tabela 11. Charakterystyka cech biometrycznych w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok. 52

Tabela 12. Terminy obserwowanych faz fenologicznych (daty podano w następującej kolejności: 2023 r.; 2024 r.; 2025 r.). 55

Tabela 13. Plon biomasy i jej wilgotność w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok. 57

Tabela 14. Plon całkowity w zależności od odmiany, roku, zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok i odmiana × zbiór kwiatów. 60

Tabela 15. Odnotowane gatunki ptaków w uprawie konopi włóknistych 63

Tabela 16. Predykcyjny profil kannabinoidowy kwiatostanów konopi w zależności od odmiany i fazy fenologicznej. 70
Tabela 17. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych źródeł zmienności i cech..... 73
Tabela 18. Skład proksymalny łodyg konopi w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku..... 75
Tabela 19. Skład elementarny łodyg konopi w zależności od odmiany i roku. 78
Tabela 20. Właściwości energetyczne łodyg konopi w zależności od odmiany i roku. 81
Tabela 21. Zawartość celulozy, hemicelulozy, ligniny i substancji ekstrakcyjnych w łodygach konopi w zależności od odmiany i roku..... 83
Tabela 22. Wartości *p* analizy wariancji dla dwu- i trójczynnikowych interakcji między odmianą, zbiorem kwiatów i rokiem w odniesieniu do badanych cech. .. 88
Tabela 23. Wybrane wskaźniki analizy statystycznej dla badanych cech..... 92
Tabela 24. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych cech..... 93
Tabela 25. Skład proksymalny stałej pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów. 94
Tabela 26. Skład elementarny stałej pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów. 97
Tabela 27. Właściwości energetyczne pozostałości w zależności od odmiany i zbioru kwiatów. 100
Tabela 28. Zawartość celulozy, hemicelulozy, ligniny i substancji ekstrakcyjnych w pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów. 102
Tabela 29. Analiza wariancji (wartości *p*) dla analizowanych cech związanych z efektywnością energetyczną produkcji łodyg i biomasy wegetatywnej konopi włóknistych..... 110
Tabela 30. Plony oraz wartość energetyczna łodyg i biomasy wegetatywnej w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów. 113
Tabela 31. Nakłady energii w produkcji łodyg oraz całkowite nakłady energii (dla łodyg i biomasy wegetatywnej) w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów. 117
Tabela 32. Energochłonność produkcji łodyg i całej biomasy wegetatywnej konopi włóknistych w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów..... 121

Lista publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska oparta jest na cyklu czterech publikacji skupiających się wokół wspólnego tytułu „Produkcja i wielokierunkowe wykorzystania konopi siewnych *Cannabis sativa* L.”.

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp. (w recenzji)

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest. (w recenzji)

Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800 (IF: 6.200; 200 pkt).

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest. (w recenzji)

Trzy spośród czterech wyżej wymienionych publikacji na dzień złożenia rozprawy doktorskiej znajdowały się na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt). Jednocześnie ich tytuły stanowiły tytuły robocze i mogły ulec modyfikacji ze względu na ewentualne poprawki po uwagach i sugestiach recenzentów oraz edytora czasopisma.

Wszystkie cztery publikacje stanowią integralną całość składającą się na niniejszą rozprawę doktorską, dlatego zostały w niej zamieszczone. W przypadku trzech nieukazanych publikacji załączono elementy potwierdzające ich wysłanie do redakcji czasopisma (rozdział 8. Załączniki) oraz informację, że na etapie przygotowywania tej rozprawy były one na etapie recenzji (rozdział 7. Oświadczenia współautorów).

Streszczenie

Konopie siewne (*Cannabis sativa* L.) są rośliną o wszechstronnym znaczeniu użytkowym, dostarczającą kwiatostanów, nasion, biomasy oraz surowców o wysokiej wartości dodanej. W warunkach rosnącego znaczenia gospodarki o obiegu zamkniętym coraz większą uwagę zwraca się na pełniejsze wykorzystanie wszystkich frakcji biomasy, w tym również pozostałości poprodukcyjnych. Rozprawa doktorska stanowi zbiór powiązanych tematycznie publikacji dotyczących produkcji i wielokierunkowego wykorzystania konopi włóknistych uprawianych w północno-wschodniej Polsce. Celem badań była kompleksowa ocena plonowania oraz przydatności biomasy siedmiu odmian (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8fc, Kompolti, Finola) w aspekcie ich wielokierunkowego wykorzystania. Badania prowadzono na słabym stanowisku glebowym, uwzględniając wpływ odmiany, roku/sezonu wegetacyjnego oraz dwóch wariantów uprawy: ze zbiorem kwiatów i bez. Oceniano cechy biometryczne roślin, plon kwiatów, nasion, biomasy i biokoncentratu, uzysk olejku eterycznego, właściwości łodyg, skład pozostałości po hydrodestylacji oraz efektywność energetyczną produkcji. Stwierdzono, że wyniki produkcyjne na glebach marginalnych były determinowane głównie przez genotyp, a dodatkowo modyfikowane przez warunki sezonu wegetacyjnego. Szczególnie niekorzystny był rok 2023, gdy susza ograniczyła wschody i obniżyła efekty produkcyjne. Najwyższy plon kwiatów uzyskano w 2024 roku, a spośród odmian wyróżniła się Białobrzeskie. Zbiór kwiatów zwiększał całkowity plon olejku eterycznego bez istotnego spadku plonu biomasy, potwierdzając możliwość dwukierunkowego użytkowania plantacji. Wyniki potwierdziły także potencjał konopi uprawianych na słabszych glebach jako rośliny przydatnej w systemach gospodarki o obiegu zamkniętym.

Słowa kluczowe: *Cannabis sativa*, konopie włókniste, plonowanie, skład chemiczny, efektywność energetyczna

Abstract

Hemp (*Cannabis sativa* L.) is a crop of versatile utility, providing inflorescences, seeds, biomass, and high-value raw materials. In the context of the growing relevance of circular economy principles, increasing attention is being paid to the comprehensive utilization of all biomass fractions, including post-production residues. This doctoral dissertation comprises a set of thematically related publications addressing the production and multidirectional use of industrial hemp cultivated in north-eastern Poland. The objective of the study was to perform a comprehensive evaluation of the yield and biomass suitability of seven cultivars (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8FC, Kompolti, and Finola) with regard to their multipurpose use. The experiment was conducted on poor-quality soil, taking into account the effects of cultivar, year/growing season, and two cultivation variants: with and without flower harvest. The assessment included biometric traits, yields, stalks properties, composition of hydrodistillation residue, and production energy efficiency. The results demonstrated that production performance under marginal soil conditions was determined primarily by genotype and further modified by year/growing-season. The year 2023 proved particularly unfavourable, as drought limited crop establishment and reduced production performance. The highest flower yield was recorded in 2024, while the cultivar Białobrzeskie was identified as the highest-yielding. Flower harvest increased total essential oil yield without significantly reducing biomass yield, thereby confirming the feasibility of dual-purpose plantation management. The findings also confirmed the potential of hemp cultivated on poorer soils as a crop well suited to circular economy systems.

Keywords: *Cannabis sativa*, industrial hemp, yield, chemical composition, energy efficiency

1. Wprowadzenie

Współczesne rolnictwo i gospodarka surowcowa stoją przed koniecznością zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii, ograniczania zużycia surowców kopalnych oraz pełniejszego wykorzystania biomasy roślinnej. Szczególnego znaczenia nabierają gatunki, które mogą dostarczać różnych produktów w ramach jednego cyklu produkcyjnego i które wpisują się w założenia bioekonomii oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Do takich roślin należą konopie siewne (*Cannabis sativa* L.), postrzegane obecnie jako gatunek o szerokim znaczeniu użytkowym, przydatny zarówno do produkcji biomasy, włókna i nasion, jak i surowców o wysokiej wartości dodanej, takich jak kwiatostany czy olejki eteryczne (Hammami i in. 2022; Schumacher i in. 2020; Varga i in. 2025). Rosnące zainteresowanie uprawą konopi wynika również z poszukiwania odnawialnych surowców wspierających zrównoważony rozwój oraz z rozwoju nowych strategii agrotechnicznych i nowych rynków wykorzystania biomasy konopnej (Dudziec i in. 2024; Enarevba i Haapala 2024).

C. sativa to gatunek, którego klasyfikacja taksonomiczna pozostaje jednym z bardziej niejednoznacznych zagadnień badawczych. Ujęcie tego taksonu ewoluowało od koncepcji jednego gatunku zaproponowanej przez Linneusza, przez podział Lamarcka na *C. sativa* i *C. indica*, a następnie propozycję wyodrębnienia *C. ruderalis* przez Janischevsky'ego, aż do późniejszego ujęcia konsolidującego te formy w obrębie jednego gatunku. Obecnie przyjmuje się, że pojedynczy gatunek *C. sativa* obejmuje podgatunki oraz odmiany, a konopie przemysłowe/włókniste są zaliczane do podgatunku *C. sativa* subsp. *sativa* (Aloo i in. 2024; Frusciante i in. 2025; Petit i in. 2025).

Konopie przemysłowe są rośliną wielokierunkowego użytkowania, a ich wartość gospodarcza wynika z możliwości jednoczesnego pozyskiwania kilku frakcji surowcowych. W jednym cyklu uprawowym mogą dostarczać biomasy, włókna, organów generatywnych wykorzystywanych do pozyskiwania olejków eterycznych i innych składników biologicznie aktywnych, a także nasion. Z tego względu ich potencjał powinien być oceniany nie tylko z punktu widzenia jednego produktu końcowego, lecz całego systemu produkcji i wykorzystania biomasy. Coraz częściej podkreśla się, że nowoczesne podejście do konopi obejmuje ocenę tej rośliny na poziomie całego łańcucha produkcji oraz dalszego zagospodarowania poszczególnych frakcji plonu (Das i in. 2017; Leoni i in. 2022; Sieracka i in. 2023; Sunoj Valiaparambil Sebastian i in. 2023). Jednocześnie podkreśla się, że wszystkie części rośliny mogą znaleźć zastosowanie jako surowce pierwotne lub wtórne, co dobrze

wpisuje się w strategie środowiskowe i ograniczanie ilości odpadów (Gitsopoulos i in. 2024; Rehman i in. 2021; Spampinato i in. 2024).

Konopie przemysłowe są obecnie zaliczane także do roślin energetycznych, co wynika z ich szybkiego wzrostu, zdolności do wytwarzania znacznych ilości biomasy, korzystnej relacji energii uzyskanej w plonie do energii poniesionej na jego wytworzenie oraz z możliwości wykorzystania biomasy w różnych kierunkach konwersji energetycznej (Abreu i in. 2022; Gitsopoulos i in. 2024; Pan i in. 2025). Roślina może stanowić surowiec do produkcji biogazu, bioetanolu, biodiesla, biowodoru oraz biopaliw stałych (Brar i in. 2024; Ingrao i in. 2021; Ji i in. 2021; Matassa i in. 2020; Rehman i in. 2021). Wskazuje się ponadto, że biomasa konopna może być wykorzystywana bezpośrednio do celów energetycznych, również w sytuacji, gdy stanowi biomasę resztkową/pozostałościową lub pochodzi z terenów szczególnych, a jej przydatność analizowano zarówno w ujęciu energetycznym, jak i środowiskowym (Kraszkiewicz i in. 2019; Todde i in. 2022; Vávrová i in. 2022). Oznacza to, że konopie przemysłowe należy postrzegać nie tylko jako roślinę włóknistą lub surowiec dla przemysłu specjalistycznego, lecz również jako perspektywiczną roślinę energetyczną o istotnym znaczeniu dla rozwoju bioekonomii i odnawialnych źródeł energii.

Na znaczenie konopi przemysłowych wpływa również możliwość ich uprawy na stanowiskach słabszych, marginalnych lub zdegradowanych (wspomniane wcześniej tereny szczególne). W literaturze zwraca się uwagę, że roślina ta może być rozpatrywana jako gatunek przydatny do zagospodarowania gruntów o ograniczonej przydatności rolniczej, a jej wykorzystanie na takich obszarach może ograniczać konkurencję z produkcją żywności. Jednocześnie podkreśla się, że odpowiedź konopi na warunki siedliskowe jest złożona i zależy od właściwości gleby, dostępności wody, przebiegu pogody w sezonie wegetacyjnym oraz doboru odmiany (De Vos i in. 2023; Giannoulis i in. 2024; Todde i in. 2022). Badania wskazują, że ograniczenia siedliskowe i deficyt wody mogą obniżać produktywność roślin, a reakcja na stres środowiskowy jest silnie uzależniona od genotypu i warunków konkretnego roku uprawy (Blandinieres i Amaducci 2022; Vandepitte i in. 2020; Žydelis i in. 2022). Wskazuje się ponadto na znaczenie plastyczności systemu korzeniowego, zróżnicowanej dostępności wody i składników pokarmowych oraz interakcji z czynnikami biotycznymi, które współkształtują reakcję roślin w warunkach słabszych siedlisk (Bajwa i in. 2025b; Islam i in. 2023).

Ważnym czynnikiem determinującym przydatność konopi do określonych warunków środowiskowych jest ich wrażliwość na fotoperiod oraz związane z tym tempo przechodzenia do faz generatywnych. Adaptacja odmian do długości dnia i szerokości geograficznej wpływa na termin kwitnienia, długość fazy wegetatywnej oraz potencjał akumulacji biomasy (Reinhardt

i in. 2021; Saragoca i in. 2026; Zhang i in. 2021). Z tego względu konieczne jest badanie większej liczby odmian w określonych warunkach szerokości geograficznej oraz uwzględnianie interakcji genotypu z terminem siewu, sezonem wegetacyjnym i przebiegiem warunków pogodowych (Bajwa i in. 2025a; Chiluwal i in. 2023). Takie podejście ma istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, ponieważ umożliwia bardziej precyzyjne dopasowanie odmiany do lokalnych warunków uprawy oraz zakładanego kierunku użytkowania plantacji.

W ostatnich latach szczególnie dynamicznie rozwija się wykorzystanie organów generatywnych konopi, zwłaszcza kwiatostanów przeznaczanych do pozyskiwania olejków eterycznych i innych związków aktywnych. Wzrost popytu na produkty zawierające ekstrakty konopne zwiększa znaczenie badań nad zawartością i wydajnością olejków eterycznych w zależności od odmiany, przebiegu sezonu, środowiska oraz stosowanej technologii uprawy i zbioru (Dudziec i in. 2024; Pieracci i in. 2021; Zheljazkov i in. 2020a; Zheljazkov i in. 2020b; Zheljazkov i in. 2025). Jednocześnie wiadomo, że skład metabolitów w organach generatywnych zmienia się w trakcie kwitnienia i po antezie, co oznacza, że termin i sposób zbioru mogą istotnie wpływać zarówno na jakość surowca, jak i na potencjalny plon produktów końcowych (Ji i in. 2021; Rahem i in. 2021; Rehman i in. 2021; Yang i in. 2020). Zwraca się także uwagę na znaczenie interakcji pomiędzy odmianą a fazą rozwojową, co uzasadnia prowadzenie badań wieloczynnikowych uwzględniających różne genotypy i terminy zbioru (Abdollahi i in. 2020).

W praktyce rolniczej coraz częściej rozważa się systemy dwukierunkowego lub wielokierunkowego użytkowania konopi, w których z jednej strony pozyskuje się surowiec z kwiatostanów, a z drugiej wykorzystuje się pozostałą biomasę, nasiona lub łodygi. Literatura wskazuje jednak, że taki model produkcji może prowadzić do określonych kompromisów plonotwórczych i wymaga empirycznej oceny wpływu poszczególnych zabiegów na strukturę plonu (Campiglia i in. 2017; Dudziec i in. 2024; Ortmeier-Clarke i in. 2023; Sullivan i in. 2025; Tsaliki i in. 2021). Istotne znaczenie mają również frakcje powstające w trakcie przetwarzania organów generatywnych, takie jak pozostałość po omłocie lub separacji, określana jako biokoncentrat, która może stanowić dodatkowe źródło olejków eterycznych, ale wymaga oceny pod względem ilościowym i jakościowym w zależności od genotypu (Bajwa i in. 2023; Dudziec i in. 2025; Zheljazkov i Maggi 2021). W tym kontekście podkreśla się także rolę waloryzacji produktów ubocznych i znaczenie podejścia biorafineryjnego, w którym opłacalność całego łańcucha technologicznego zależy od pełniejszego wykorzystania wszystkich frakcji biomasy (Burgel i in. 2020; Brar i in. 2024; Scordia i in. 2022).

Szczególnie ważnym komponentem plonu konopi są łodygi, które stanowią obfitą frakcję lignocelulozową i mogą być wykorzystywane w bioenergetyce oraz w systemach biorafineryjnych. Dzięki wysokiej zawartości celulozy i stosunkowo niskiej zawartości ligniny konopie uznawane są za obiecujący surowiec do produkcji bioetanolu, choć wymagają odpowiedniego wstępnego przygotowania ze względu na odporność biomasy na czynniki chemiczne (Das i in. 2020; Ji i in. 2021; Rehman i in. 2021; Zhao i in. 2020a). Wskazuje się także możliwość integrowania produkcji biodiesla i bioetanolu w ramach biorafinerii, a ponadto wykorzystania ligniny do wytwarzania paliw i innych produktów chemicznych (Brar i in. 2024; Rehman i in. 2021; Viswanathan i in. 2021). Biomasa konopna może być również stosowana do produkcji biogazu i biowodoru (Ingrao i in. 2021; Matassa i in. 2020; Rehman i in. 2021). Jednocześnie wskazuje się, że łodygi i słoma konopna cechują się korzystnymi właściwościami paliwowymi, a tym samym mogą stanowić wartościowy surowiec do wytwarzania pelletu, brykietu lub do wykorzystania w procesach termochemicznych (Chaowana i in. 2024; Kraszkiewicz i in. 2019; Roman i Grzegorzewska 2024).

W kontekście przemysłowego wykorzystania konopi należy podkreślić, że znaczna część biomasy pozostałej po pozyskaniu głównego produktu bywa nadal traktowana jako odpad, mimo że może stanowić cenny surowiec wtórny. Dotyczy to zarówno biomasy pozostającej po produkcji surowca dla sektora kannabidiolu (CBD), jak i frakcji pozostających po hydrodestylacji czy innych procesach ekstrakcyjnych (Altman i in. 2024; Frusciante i in. 2025; Wang i in. 2024). Coraz wyraźniej zaznacza się zatem potrzeba oceny potencjału współproduktów i pozostałości poprodukcyjnych, ponieważ właśnie one mogą decydować o pełnej efektywności ekonomicznej i środowiskowej całego systemu wykorzystania konopi (Spampinato i in. 2024). W odniesieniu do roślin aromatycznych i leczniczych podkreśla się, że biomasa pozostała po ekstrakcji, np. hydrodestylacji, nie powinna być traktowana wyłącznie jako odpad, lecz jako uboczny produkt o potencjale dalszego wykorzystania zgodnie z zasadami gospodarki cyrkularnej (de Elguea-Culebras i in. 2022; Kumar i in. 2024). Wskazuje się również, że pozostałości po produkcji olejków eterycznych mogą być wykorzystane m.in. energetycznie, materiałowo lub jako źródło kolejnych związków cennych użytkowo (Abu Bakar i in. 2020; Christaki i in. 2022; Deshmukh i in. 2015; Fidan i in. 2021; Marcelino i in. 2023).

We współczesnej ocenie przydatności konopi jako rośliny przemysłowej i energetycznej nie wystarcza jednak analiza samego plonu biomasy. Coraz większego znaczenia nabiera ocena efektywności energetycznej systemów produkcji, obejmująca relację między energią uzyskaną w plonie a energią zużytą na jego wytworzenie. W literaturze podkreśla się, że przemysłowe

konopie są obiecującym surowcem dla bioenergetyki, ale ich rzeczywista wartość zależy nie tylko od plonu, lecz także od energochłonności całego procesu produkcyjnego i przyjętego scenariusza wykorzystania biomasy (Brar i in. 2022; Finnan i Styles 2013; Ingrao i in. 2021; Visković i in. 2023). Dotychczasowe badania wykazały, że wysokość plonu biomasy i energii jest silnie uzależniona od czynników agrotechnicznych, odmiany oraz przebiegu sezonu wegetacyjnego, a termin zbioru może decydować zarówno o kierunku użytkowania biomasy, jak i o wydajności energetycznej z jednostki powierzchni (Kołodziej i in. 2023; Kreuger i in. 2011a; Prade i in. 2011). Dodatkowo nawet częściowe zastąpienie nawozów mineralnych mniej energochłonnymi nawozami organicznymi może poprawiać bilans energetyczny i ograniczać zużycie paliw kopalnych oraz emisję gazów cieplarnianych (Jankowski i in. 2023; Krzyżaniak i in. 2019).

Ocena systemów opartych na konopiach wymaga również powiązania technologii polowej z dalszym przetwarzaniem i końcowym wykorzystaniem biomasy. Znaczenie ma zarówno termin zbioru, jak i sposób przetworzenia oraz finalny kierunek użytkowania – energetyczny, materiałowy czy związany z wykorzystaniem nasion i produktów specjalistycznych. Rzeczywista efektywność energetyczna i środowiskowa systemów konopnych zależy właśnie od relacji pomiędzy tymi elementami oraz od właściwego wyznaczenia granic analizowanego systemu (Campiglia i in. 2020; Kiesse i in. 2017; Nazari i Woods 2025; Todde i in. 2022; Vávrová i in. 2022). Z tego względu uzasadnione jest prowadzenie badań integrujących ocenę plonowania, jakości biomasy, charakterystyki pozostałości poprodukcyjnych oraz wskaźników efektywności energetycznej.

Wciąż istnieje potrzeba badań kompleksowych, uwzględniających jednocześnie wpływ warunków środowiskowych, przebiegu sezonu, odmiany i sposobu prowadzenia plantacji na ilość i jakość uzyskiwanych biosurowców. W szczególności uzasadnione są badania prowadzone na glebach słabszych, pozwalające oddzielić wpływ genotypu, sezonu wegetacyjnego/roku i wybranych zabiegów agrotechnicznych na strukturę plonu oraz właściwości biomasy (Blandinieres i Amaducci 2022; Pieracci i in. 2021; Reinhardt i in. 2021; Bajwa i in. 2025a; Hammami i in. 2022; Kaur i in. 2024). Potrzeba ta dotyczy zarówno plonu kwiatostanów i olejków eterycznych, jak i jakości łodyg, możliwości zagospodarowania pozostałości po hydrodestylacji oraz energetycznej efektywności systemu produkcji. Tego typu zintegrowane ujęcie odpowiada aktualnym kierunkom rozwoju bioekonomii, w której coraz większe znaczenie ma pełne wykorzystanie biomasy i ograniczanie strat surowcowych na każdym etapie łańcucha wartości.

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej była właśnie taka wieloaspektowa ocena konopi przemysłowych uprawianych w warunkach północno-wschodniej Polski. Układ badań obejmował analizę wpływu odmiany, sezonu wegetacyjnego oraz zbioru kwiatów na strukturę plonu, ocenę jakości łodyg jako surowca biomasowego, charakterystykę stałej pozostałości po hydrodestylacji oraz analizę efektywności energetycznej produkcji biomasy łodygowej i biomasy wegetatywnej. Takie podejście umożliwiło ocenę przydatności konopi przemysłowych jako rośliny wielokierunkowego użytkowania oraz pozwoliło lepiej określić ich znaczenie w zrównoważonych systemach produkcji rolniczej i bioenergetycznej.

2. Przedmiot badań, hipotezy badawcze oraz cele rozprawy doktorskiej

Przedmiotem badań w niniejszej rozprawie doktorskiej były konopie przemysłowe/włókniste (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) uprawiane w warunkach północno-wschodniej Polski na glebie słabszej, analizowane jako roślina wielokierunkowego użytkowania, przeznaczona do pozyskiwania biomasy, kwiatów, olejku eterycznego oraz współproduktów i pozostałości poprodukcyjnych. Badania prowadzono w układzie trzyletniego doświadczenia polowego, obejmującego siedem odmian konopi oraz dwa warianty technologiczne: bez zbioru kwiatów oraz ze zbiorem kwiatów w fazie kwitnienia.

Zakres badań obejmował cztery wzajemnie uzupełniające się obszary. Po pierwsze, oceniono wpływ odmiany, warunków sezonu wegetacyjnego/roku oraz zbioru kwiatów na strukturę i wielkość plonu, w tym plon kwiatów, nasion, biomasy oraz pozostałości po omłocie (biokoncentratu), a także na uzysk olejku eterycznego z kwiatów i biokoncentratu. Po drugie, określono jakość łodyg konopi jako biosurowca, analizując ich właściwości fizykochemiczne, energetyczne i lignocelulozowe w zależności od odmiany, roku badań i zbioru kwiatów. Po trzecie, scharakteryzowano stałą pozostałość po hydrodestylacji, traktowaną jako produkt uboczny przetwarzania biomasy konopnej, pod kątem jej składu chemicznego i potencjału dalszego zagospodarowania. Po czwarte, oceniono nakłady energii, wartość energetyczną plonu oraz wskaźniki efektywności energetycznej produkcji łodyg i całkowitej biomasy wegetatywnej konopi w zależności od ww. czynników.

W ujęciu syntetycznym przedmiot badań stanowiła więc kompleksowa ocena przydatności konopi przemysłowych uprawianych na słabym stanowisku glebowym do wielokierunkowego wykorzystania, z uwzględnieniem zarówno plonowania i jakości surowca, jak i możliwości waloryzacji produktów ubocznych oraz energetycznej efektywności systemu produkcji. Taki zakres odpowiada lukom badawczym występującym w literaturze przedmiotu: niedostatecznej liczbie danych dla gleb marginalnych, potrzebie oceny jakości łodyg w różnych uwarunkowaniach produkcji, brakowi kompleksowej charakterystyki pozostałości po hydrodestylacji oraz konieczności analizy efektywności energetycznej w zależności od odmiany czy technologii pozyskania biomasy.

Na podstawie danych literaturowych oraz innych badań własnych postawiono kilka hipotez badawczych, które zakładały, że

- odmiana oraz warunki sezonu wegetacyjnego istotnie różnicują wielkość i strukturę plonu konopi uprawianych na słabym stanowisku glebowym, przy czym genotyp

jest jednym z głównych czynników kształtujących plon kwiatów, nasion, biomasy oraz biokoncentratu;

- zbiór kwiatów w fazie kwitnienia zwiększa całkowity uzysk olejku eterycznego, nie powodując jednocześnie obniżenia całkowitego plonu biomasy; odpowiednio dobrana technologia zbioru zwiększa liczbę użytecznych strumieni surowcowych z jednej plantacji i wzmacnia wielokierunkowy charakter użytkowania rośliny;
- jakość łodyg konopi jako biosurowca jest zależna od odmiany i sezonu wegetacyjnego/roku uprawy, natomiast wpływ zbioru kwiatów na większość cech jakościowych łodyg jest ograniczony; właściwości fizykochemiczne, energetyczne i lignocelulozowe łodyg wykazują zróżnicowanie genotypowe i sezonowe;
- stała pozostałość po hydrodestylacji posiada cechy chemiczne i energetyczne uzasadniające jej traktowanie jako wartościowy współprodukt, a nie odpad; materiał cechuje się profilem umożliwiającym jego dalszą waloryzację w procesach biologicznych i termicznych;
- efektywność energetyczna produkcji biomasy konopi przemysłowych zależy od odmiany i sezonu wegetacyjnego/warunków w roku badań;
- konopie przemysłowe uprawiane na glebach słabszych mogą stanowić efektywną roślinę wielokierunkowego użytkowania, łączącą funkcję surowca przemysłowego, energetycznego i źródła produktów wysokowartościowych; założono zatem, że kompleksowa ocena plonu, jakości biomasy, współproduktów i wskaźników energetycznych potwierdzi przydatność tego gatunku do zastosowań w bioekonomii i gospodarce o obiegu zamkniętym.

W związku z powyższym głównym celem badań w ramach rozprawy doktorskiej była ocena plonowania i przydatności biomasy siedmiu odmian konopi siewnych *C. sativa* subsp. *sativa* w aspekcie wielokierunkowego wykorzystania. Natomiast cele szczegółowe były następujące:

- dokonanie kompleksowej oceny produkcyjnego i użytkowego potencjału konopi uprawianych na słabym stanowisku glebowym w regionie północno-wschodniej Polski, z uwzględnieniem zróżnicowania względem odmiany, sezonu wegetacyjnego/roku oraz ręcznego pozyskiwania kwiatostanów w okresie kwitnienia;
- określenie wpływu odmiany, sezonu wegetacyjnego/roku badań oraz pozyskiwania kwiatostanów w fazie kwitnienia na cechy biometryczne oraz strukturę i wielkość plonu;

- zweryfikowanie wpływu ręcznego zbioru kwiatostanów na plon frakcji kwiatostanów, plon nasion, plon biomasy oraz całkowity uzysk olejku eterycznego otrzymanego zarówno z kwiatostanów, jak i z biokoncentratu uzyskanego po omłocie;
- dokonanie oceny właściwości fizykochemicznych i energetycznych biomasy łodygowej konopi siewnych, obejmujących analizę przybliżoną i elementarną, wartość opałową, udział składników lignocelulozowych oraz zawartość substancji ekstrakcyjnych;
- określenie wpływu odmiany, sezonu wegetacyjnego/roku oraz pozyskiwania kwiatostanów na skład chemiczny i właściwości energetyczne łodyg konopi;
- scharakteryzowanie składu oraz właściwości stałej pozostałości po hydrodestylacji, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów istotnych z punktu widzenia jej dalszego zagospodarowania;
- określenie zróżnicowania międzyodmianowego właściwości pozostałości po hydrodestylacji oraz ocena jej potencjalnej przydatności w procesach konwersji biochemicznej, termicznej i termochemicznej;
- wyznaczenie nakładów energetycznych związanych z technologią uprawy oraz określenie wartości energetycznej pozyskanej biomasy łodygowej i całej biomasy wegetatywnej;
- ocena wskaźników efektywności energetycznej produkcji biomasy w zależności od odmiany, sezonu wegetacyjnego/roku oraz wariantu technologicznego uwzględniającego ręczne pozyskiwanie kwiatostanów w okresie kwitnienia.

3. Materiały i metody

3.1. Doświadczenie polowe

Doświadczenie polowe usytuowane było na terenie Stacji Dydaktyczno-Badawczej Bałdy, oddział Tomaszkowo, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Współrzędne geograficzne: 53.71, 20.43. Eksperyment obejmował trzy kolejne lata/sezony wegetacyjne (2023, 2024 i 2025) i prowadzony był na słabym stanowisku glebowym. Była to gleba płowa o składzie granulometrycznym warstwy ornej odpowiadającym piaskowi gliniastemu lekkiemu; niskiej zawartości węgla organicznego (0,81%); i o niskim pH (4,7). Szczegółową charakterystykę stanowiska glebowego przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Charakterystyka stanowiska glebowego.

Parametr	Wartość
Typ gleby	gleba płowa
Geneza gleby	utworzona z pyłów wodnego pochodzenia, utworów lessowych oraz pyłów nieznanego pochodzenia
Skład granulometryczny	warstwy ornej odpowiadał piaskowi gliniastemu lekkiemu pylastemu; frakcja iłu (<0,002 mm) = 2,24%; pyłu (0,002–0,05 mm) = 25,62%; piasku (0,05–2 mm) = 72,14%; warstwa przejściowa odpowiadała glinie piaszczystej, a warstwa głębsza — glinie lekkiej
pH warstwy ornej	4,7
Zawartość węgla organicznego warstwy ornej (materii organicznej)*	0,81% (1,40%)
Zawartość form przyswajalnych w warstwie ornej	P_2O_5 – 0,022%; K_2O – 0,015%; Mg – 0,004% (odpowiednio 220;150 i 40 mg kg^{-1} s.m. gleby)
Klasa bonitacyjna gleby	IVb
Kompleks przydatności rolniczej gleby	5 (żytni dobry)

*przy zastosowaniu standardowego przelicznika: materia organiczna gleby (%) = węgiel organiczny gleby (%) × 1,724 (współczynnik Van Bemmelena).

Eksperyment zrealizowany został w układzie losowanych bloków z trzema powtórzeniami i składał się z 42 poletek: 7 odmian × 2 zbiory kwiatów (uprawa ze zbiorem kwiatów podczas kwitnienia oraz bez zbioru kwiatów) × 3 powtórzenia. Powierzchnia każdego poletka wynosiła 14,4 m^2 (długość poletka 9 m; szerokość poletka 1,6 m; szerokość

międzyrzędzi 0,4 m). Uprawiano siedem odmian: Białobrzeskie i Henola (pochodzenie: Polska); Earlina 27, Santhica 27 i Santhica 70 (Francja); Finola (Finlandia); Kompolti (Węgry). Genotypy były względem siebie zróżnicowane nie tylko pod względem pochodzenia, ale również pienności (dwupienne, jednopienne) czy typu populacji/sposobu hodowli (tab. 2).

Tabela 2. Dane dotyczące odmian konopi włóknistych na podstawie krajowych rejestrów odmian roślin uprawnych (Polska: COBORU; Francja: GEVES; Węgry: NÉBIH; Finlandia: Ruokavirasto).

Odmiana	Pierwsza rejestracja	Pierwszy wnioskodawca/właściciel praw	Typ populacji/sposób hodowli	Typ płciowości
Białobrzeskie	1967	Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich – Państwowy Instytut Badawczy	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	jednopienna
Henola	2017	Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich – Państwowy Instytut Badawczy	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	jednopienna
Santhica 27	2002	Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre	populacja zawężona	jednopienna
Santhica 70	2007	Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	jednopienna
Earlina 8fc	2018	Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	jednopienna
Kompolti	1954	MATE Károly Róbert Campus – Fleischmann R. Research Institute	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	dwupienna
Finola	2003	James C. Callaway	odmiana populacyjna o swobodnym zapyleniu	dwupienna

Gęstość/norma siewu wynosiła zawsze 100 zdolnych do kiełkowania (w warunkach laboratoryjnych) nasion przypadających na metr kwadratowy pola doświadczalnego. Uwzględniając, m.in. zróżnicowaną masę tysiące nasion (tab. 3), było to średnio 15; 16; 20; 20; 14; 29; i 14 kg nasion ha^{-1} (odpowiednio Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8fc, Kompolti i Finola).

Tabela 3. Charakterystyka materiału siewnego (wartości średnie dla lat 2023−2025).

Odmiana	Masa tysiąca nasion (g)	Zdolność kiełkowania (%)	Masa wysianych nasion (kg ha^{-1})
Białobrzeskie	14	95	15
Henola	13	85	16
Santhica 27	16	83	20
Santhica 70	15	79	20
Earlina 8fc	12	91	14
Kompolti	20	70	29
Finola	11	81	14

Przedplonem w każdym roku badań był owies zwyczajny (*Avena sativa* L.). Po zbiorze owsa kolejność zabiegów agrotechnicznych była zawsze następująca: uprawa pożniwna; wapnowanie (kreda w formie granulatu o 80% zawartości $CaCO_3$ rozdrobniona w ilości 600 kg ha^{-1}; ekwiwalent tlenkowy CaO równy 45%); orka przedzimowa; uprawa przedsiewna (kultywator) i nawożenie przedsiewne połączone z bronowaniem (N – 60, P_2O_5 – 45, K_2O – 60 kg ha^{-1}; N w formie saletry amonowej; P w formie superfosfatu potrójnego; K w formie soli potasowej). Terminy siewu: 15.05.2023; 15.05.2024; i 06.06.2025 (stosowano siewnik rzędowy; głębokość siewu 3 cm). Podczas uprawy nie stosowano chemicznych środków ochrony roślin, a jedynie pielęgnację mechaniczną. Pogłównie w trakcie wegetacji wysiewano N w formie saletry amonowej w ilości 60 kg ha^{-1}.

Warunki meteorologiczne w poszczególnych sezonach wegetacyjnych były zróżnicowane i przedstawiono je w tab. 4 i 5, w tym za pomocą współczynnika hydrotermicznego Sielianinova (Stadnik i in. 2024), oraz na wykresach (rys. 1−3).

Tabela 4. Warunki wodno-termiczne podczas wegetacji konopi w kolejnych latach scharakteryzowane za pomocą współczynnika hydrotermicznego Sielianinowa*.

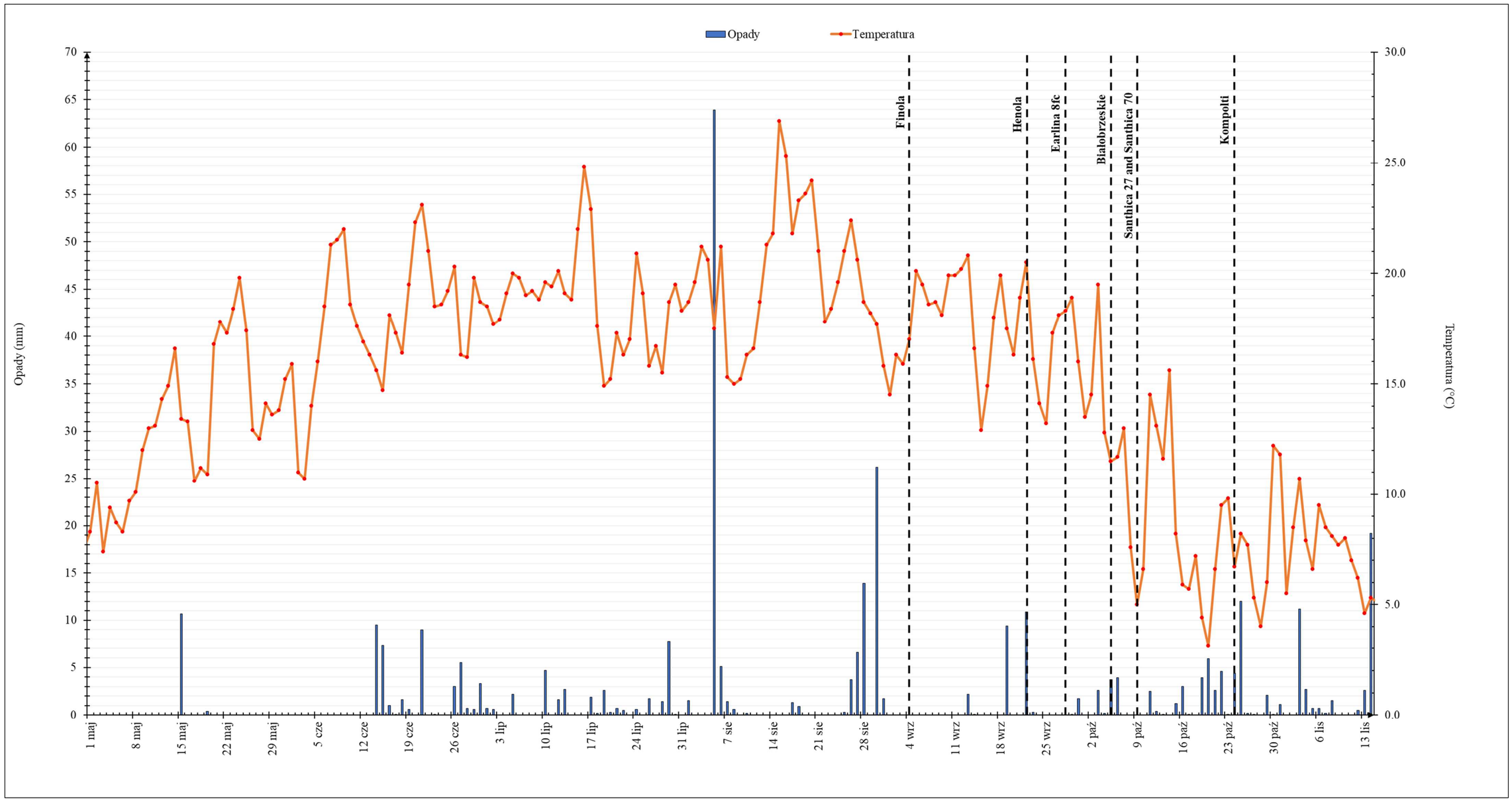
Miesiąc	2023	2024	2025
Maj	0,8	1,0	–
Czerwiec	2,4	1,6	2,5
Lipiec	1,6	8,5	7,2
Sierpień	6,4	1,4	3,3
Wrzesień	1,4	1,4	5,8
Październik	4,0	3,2	8,7
Listopad	–	–	1,2

*współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa definiuje się jako stosunek sumy opadów (mm) do jednej dziesiątej sumy średnich dobowych temperatur powietrza (°C); 3 — skrajnie wilgotno; 2,6–3,0 — bardzo wilgotno; 2,1–2,5 — wilgotno; 1,7–2,0 — umiarkowanie wilgotno; 1,4–1,6 — optymalnie; 1,1–1,3 — umiarkowanie sucho; 0,8–1,0 — sucho; 0,4–0,7 — bardzo sucho; < 0,4 — skrajnie sucho; obliczenia obejmują okres od terminu siewu wszystkich odmian do zbioru ostatniej odmiany, tj. dla 2023 r. od 15 maja do 24 października, dla 2024 r. od 15 maja do 18 października,dla 2025 r. od 6 czerwca do 7 listopada.

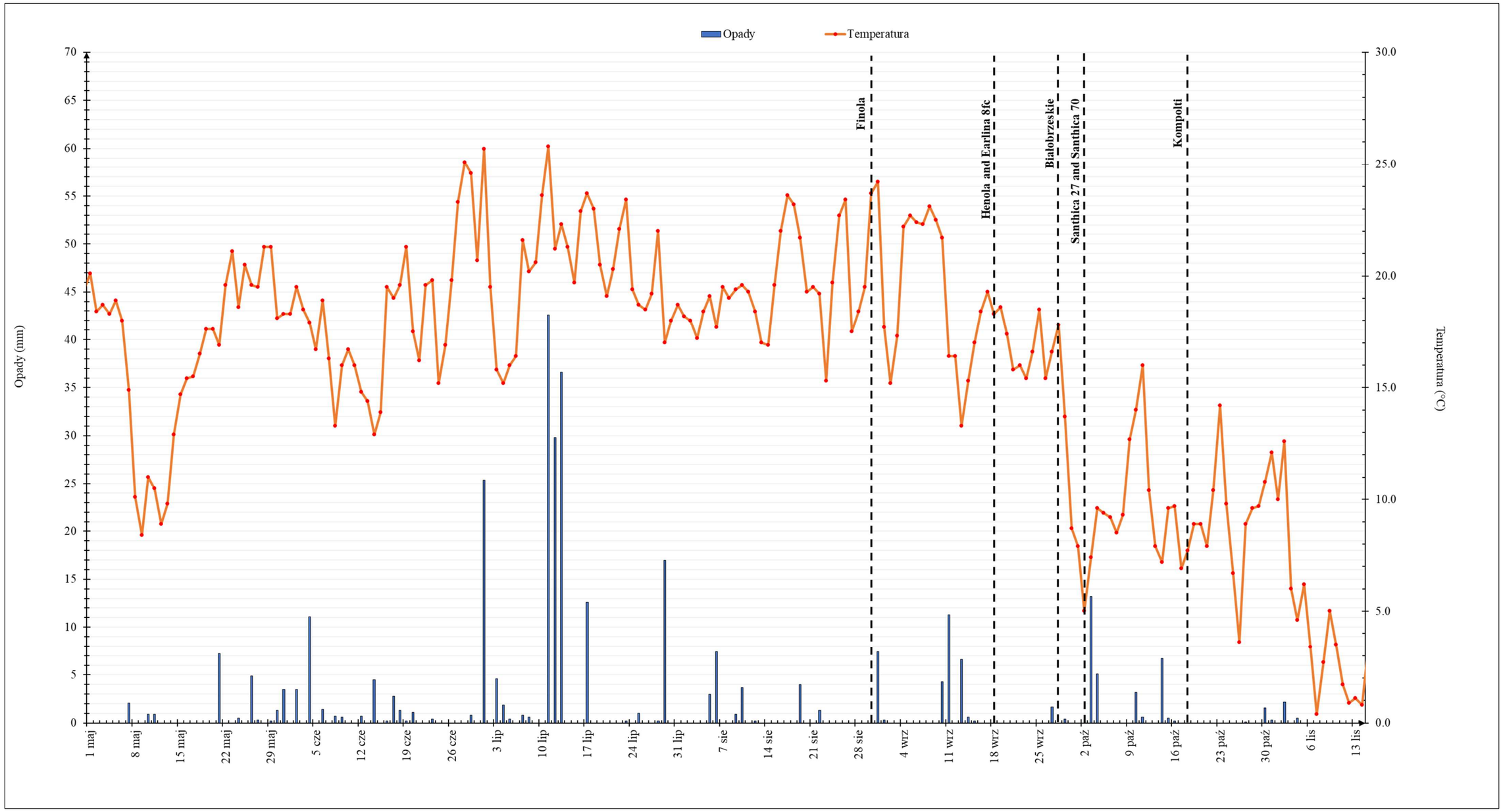
Tabela 5. Warunki meteorologiczne (suma opadów w mm | średnia temperatura powietrza w °C) w sezonach wegetacyjnych (od terminu siewu wszystkich odmian do zbioru ostatniej odmiany)*.

Miesiąc	2023	2024	2025
Maj	12,5 | 14,6	17,9 | 18,4	–
Czerwiec	42,3 | 17,9	29,3 | 18,1	64,2 | 16,9
Lipiec	30,2 | 18,7	173,7 | 20,4	134,1 | 18,6
Sierpień	127,3 | 19,8	27,9 | 19,7	56,1 | 17,3
Wrzesień	24,7 | 17,6	25,4 | 17,7	88,7 | 15,2
Październik	54,8 | 9,4	31,5 | 9,4	71,1 | 8,2
Listopad	–	–	41,0 | 3,2
Sezon wegetacyjny	290,4 | 16,3	305,7 | 17,3	424,2 | 13,0

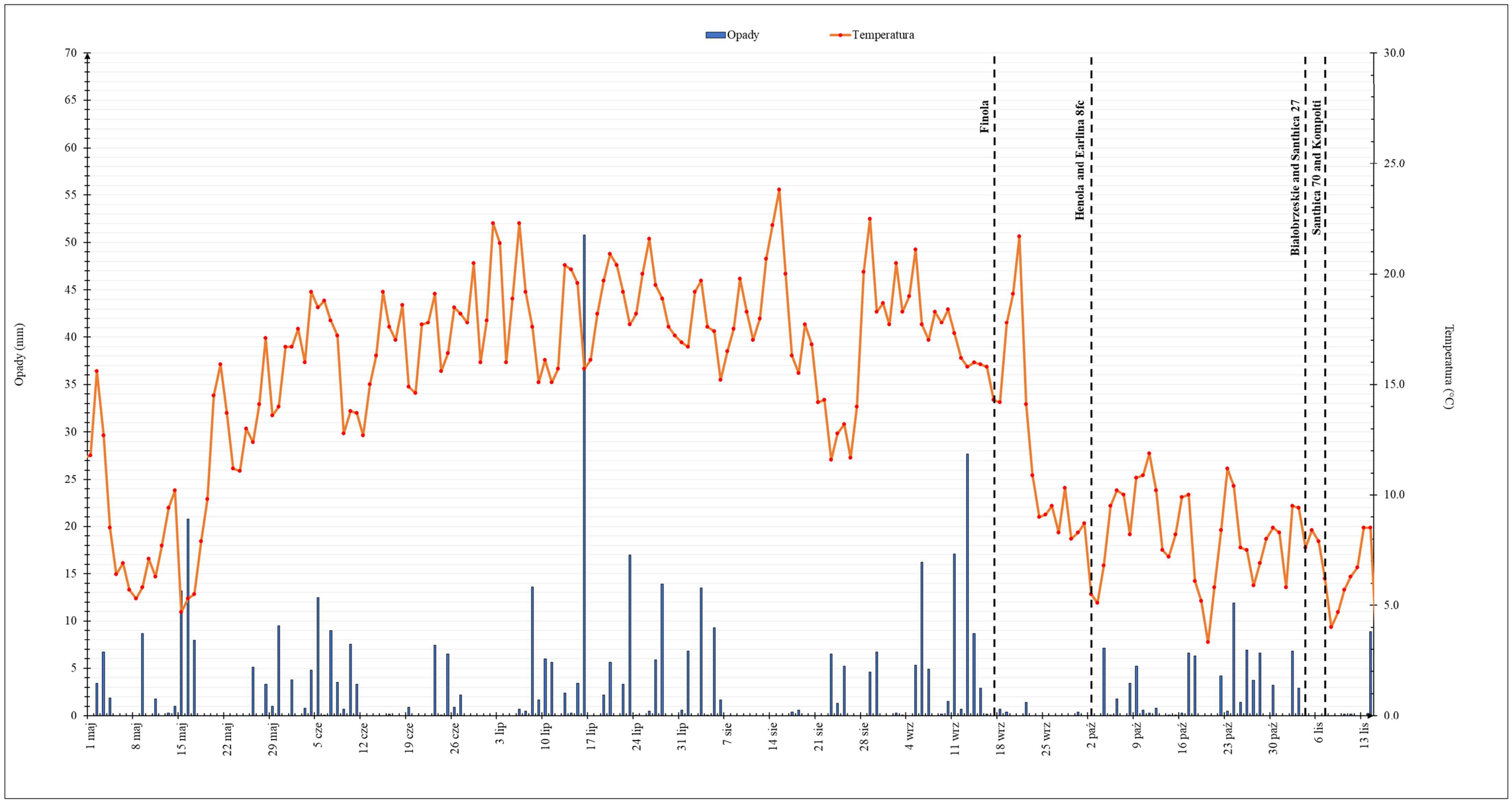
*dla 2023 r.: od 15 maja do 24 października; dla 2024 r.: od 15 maja do 18 października; dla 2025 r.: od 6 czerwca do 7 listopada.



Rysunek 1. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2023 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian.



Rysunek 2. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2024 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian.



Rysunek 3. Warunki pogodowe w sezonie uprawy konopi włóknistych w 2025 roku; słupki przedstawiają opady (sumy dobowe), a linie oznaczają temperaturę powietrza (średnią dobową). Pionowe linie przerywane wskazują terminy zbioru poszczególnych odmian.

3.2. Określenie plonu, pomiary biometryczne i obserwacje fenologiczne

Każda odmiana, jak wspomniano wcześniej, uprawiana była w dwóch wariantach: ze zbiorem kwiatów podczas kwitnienia oraz bez zbioru kwiatów. Zbiór kwiatów (inaczej kwiatostanów, wiech) polegał na ręcznym odcinaniu wiech (u osobników żeńskich w przypadku odmian dwupiennych, a w przypadku odmian jednopiennych u osobników nasiennych) zlokalizowanych na szczytach pędów głównych (odcinano maksymalnie ok. 15 cm). Za kwitnienie przyjęto fazę fenologiczną, w której podsadki były ze słupkami, przy czym białe znamiona słupków wystawały z podsadek; a brązowe znamiona słupków, jeżeli były obecne, to stanowiły zdecydowanie mniejszą część/udział. W systemie kodyfikacji BBCH odpowiadało to kodowi 65 (przed 67, w którym ma miejsce widoczne zawiązywanie owoców) (Mishchenko i in. 2017), a w kodyfikacji Mediavilla i in. (1998) etapowi mającemu miejsce ok. 2202 (odmiany dwupienne) i 2302 (odmiany jednopienne). Zbioru kwiatów dokonywano, gdy na co najmniej dwóch poletkach (każdy wariant doświadczenia był w trzech powtórzeniach) ponad połowa roślin znajdowała się w tej fazie. Całość zebranych kwiatów była ważona, a jednocześnie pobierane były próbki celem laboratoryjnego określenia wilgotności. Resztę kwiatów zamrażano.

Dla ograniczenia efektu brzegowego zbiór roślin wykonywany był jedynie z części wewnętrznych poletek (9,6 m^2). Termin zbioru, nie uwzględniając zdarzeń losowych, np. dostępność siły roboczej i środków produkcji czy warunki meteorologiczne, wyznaczała faza fenologiczna. Zbioru dokonywano, gdy na co najmniej dwóch poletkach ponad połowa roślin posiadała w środkowej części wiech ponad połowę dojrzałych owoców. W BBCH odpowiadało to kodowi 85 (Mishchenko i in. 2017), wg Mediavilla i in. (1998) etapowi 2204 (odmiany dwupienne) i 2306 (odmiany jednopienne). Rośliny zbierane były za pomocą kosy spalinowej wyposażonej w tarczę tnącą i ważone na wadze platformowej. Jednocześnie pobierane były pozyskane pędy celem laboratoryjnego określenia wilgotności biomasy. W ten sposób określany był plon biomasy oraz całkowity plon biomasy (w przypadku poletek ze zbiorem kwiatów w okresie kwitnienia była to suma plonu biomasy oraz plonu uprzednio zebranych kwiatów). Następnie odcinano górne części łodyg, na których zlokalizowane były wiechy. Górne części łodyg z wiechami były młócone w kombajnie, w wyniku czego otrzymano mieszaninę nasion oraz pozostałości po młóceniu/biokoncentrat (liście, kwiaty, zielone i brunatne kielichy/podsadki tworzące okrywę orzeszków, zielone kielichy/podsadki z niedojrzałymi orzeszkami, puste orzeszki i nasiona, drobne gałązki stanowiące osie kwiatostanów oraz fragmenty włókna i paździerza). Efektem procesu było również pozyskanie

omłóconych górnych części łodyg. Całość łodyg pozostawiano na polu. Mieszanina nasion i biokoncentratu była składowana w zamkniętych pomieszczeniach (stodoła) z dostępem świeżego powietrza. Po naturalnym wysuszeniu z mieszaniny odseparowywano nasiona. Użyto w tym celu laboratoryjnego separatora (typ SZD) do oznaczania masy doczyszczonego ziarna (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego, Poland). Poszczególne frakcje ważono i określany był ich plon. Całość przechowywano w zamkniętym plastikowych opakowaniach. W 2023 roku, m.in. ze względu na brak dostępu do kombajnu poletkowego, z łodyg ręcznie odseparowano mieszaninę nasion oraz biokoncentratu, przez co frakcja biokoncentratu była praktycznie w całości pozbawiona domieszki włókna oraz paździerza. Trzeba również zaznaczyć, że w tym roku odseparowano mieszaninę z całej długości pędów, a nie tylko z górnych części łodyg. Taki schemat postępowania sprawił, że frakcja ta zawierała w swojej masie więcej m.in. kwiatów i liści. Pozostały sposób postępowania z materiałem był tożsamy.

Zawsze w dniu zbioru (tab. 6) wykonywano pomiary wysokości oraz średnicy pędów (po 10 losowych pomiarów przypadających na część wewnętrzną każdego poletka). W fazie kwitnienia określany był udział osobników męskich oraz zagęszczenie roślin/obsada (liczono wszystkie rośliny na poletku oraz wszystkie osobniki męskie). Z zakresu badań fenologicznych wyznaczono daty początku kwitnienia, kwitnienia, późnego kwitnienia/początku dojrzewania nasion oraz dojrzewania nasion. Poprzez początek kwitnienia rozumiano pojawienie się podsadek, jeszcze bez znamion słupków; etap między 2202 i 2203 oraz 2302 i 2303 wg Mediavilla i in. (1998); BBCH ok. 55 (Mishchenko i in. 2017). W fazie późnego kwitnienia/początku dojrzewania nasion podsadki posiadały brązowe znamiona słupków, część znamion była pozaginanych w dół, a równocześnie widoczne były białawe trichomy; kwiaty zaczynały lepić się w palcach i sprawiały wrażenie żywicznych; etap 2203 i 2303 wg Mediavilla i in. (1998); BBCH 67 (Mishchenko i in. 2017). Natomiast dojrzewanie nasion to moment, w którym pojedyncze podsadki w obrębie kwiatów były brązowawe, a część podsadek miała wewnątrz dojrzałe orzeszki; etap 2200 i 2300 wg Mediavilla i in. (1998); BBCH 81 (Mishchenko i in. 2017).

W całościowych analizach statystycznych (podrozdział 3.5.) nie uwzględniono danych z 2023 roku (plon, zawartość olejku eterycznego, wysokość i średnica roślin, obsada, udział osobników męskich itd.) ze względu na bardzo trudne warunki meteorologiczne na początku okresu wegetacji, których efektem były bardzo słabe wschody roślin, przez co uzyskane wyniki nie były miarodajne w porównaniu do kolejnych dwóch lat badań. Wyniki dla 2023 roku przedstawiono w osobnych tabelach, które znajdują się w rozdziale 8. Załącznik (tab. Z1−Z5), a także odniesiono się do nich w rozdziale 4. Wynikach i dyskusja. W tym rozdziale omówiono

i przeanalizowano również warunki meteorologiczne panujące na początku sezonu wegetacyjnego 2023 w aspekcie ich wpływu na plon i jego strukturę.

Tabela 6. Terminy zbioru poszczególnych odmian konopi włóknistych w sezonach wegetacyjnych 2023, 2024 i 2025. Liczby w nawiasach oznaczają liczbę dni od wysiewu w danym roku.

Odmiana	2023	2024	2025	Średnia
Białobrzeskie	5 października (143)	25 września (133)	4 listopada (151)	142 ± 9
Henola	22 września (130)	18 września (126)	2 października (118)	125 ± 6
Santhica 27	9 października (147)	2 października (140)	4 listopada (151)	146 ± 6
Santhica 70	9 października (147)	2 października (140)	7 listopada (154)	147 ± 7
Earlina 8fc	28 września (136)	18 września (126)	2 października (118)	127 ± 9
Kompolti	24 października (162)	18 października (156)	7 listopada (154)	157 ± 4
Finola	4 września (112)	30 sierpnia (107)	17 września (103)	107 ± 5

Łodygi (w zdecydowanej większości pozbawione pędów bocznych) pozyskiwano zawsze bezpośrednio po zbiorze roślin, w tym samym dniu. Z każdego poletka losowo pobrano trzy łodygi z roślin nasiennych i umieszczono je w workach foliowych (rośliny jednopienne w przypadku odmian jednopiennych oraz rośliny żeńskie w przypadku odmian dwupiennych).

3.3. Analizy laboratoryjne

Po dostarczeniu próbek do laboratorium oznaczano wilgotność (W). Próbki umieszczano w suszarce laboratoryjnej w 105°C i suszono do uzyskania stałej masy (norma PN-EN ISO 18134–1:2015). Kwiaty oraz biokoncentraty poddano hydrodestylacji zgodnie z normami PN-EN ISO 6571 i PN-EN ISO 6571:2009/A1. Do kolb o pojemności 2 L wkładano każdorazowo po 200 g wyjętych z zamrażarki kwiatów, a w przypadku biokoncentratu 100 g tego materiału. Następnie zalewano wodą destylowaną w ilości 1300−1350 mL. W 2023 roku, ze względu na mniejsze ilości pozyskanych kwiatów oraz biokoncentratu, do kolb o pojemności 1 L dodawano odpowiednio po 50 g biokoncentratu i 100 g kwiatów. Następnie zalewano 600 ml wody destylowanej. Czas hydrodestylacji wynosił zawsze 4 godziny (licząc od momentu rozpoczęcia gotowania). Przed hydrodestylacją biokoncentratu określana

była jego W. Zawartość olejku eterycznego przeliczano na mL 100 g^{-1} s.m. (suchej masy). Następnie obliczano plon olejku eterycznego, który wyrażono w L ha^{-1}.

W 2024 i 2025 roku określono dodatkowo predykcyjną zawartość kannabidiolu (CBD) oraz tetrahydrokannabinolu (THC) w kwiatach na etapie kwitnienia, późnego kwitnienia/początku dojrzewania nasion oraz dojrzewania nasion. Wykorzystano w tym celu urządzenie przenośnej spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRLAB Cannabis) do nieniszczącej identyfikacji składu próbki na podstawie widma odbiciowego. Pomiar polegał na skierowaniu głowicy pomiarowej na materiał (kwiaty) i wykonaniu odczytów z dwóch miejsc próbki, a następnie widma uśredniano. Dla dodatkowego ograniczenia wpływu heterogeniczności materiału roślinnego z każdego poletka pobierano po pięć kwiatów (czyli 30 kwiatów przypadających na każdą odmianę w danej fazie fenologicznej). Aby nie wpłynąć na główny cel doświadczenia polowego, próbki kwiatów na potrzeby tego dodatkowego badania nie były pobierane z części wewnętrznych poletek. Po pobraniu kwiatów były one naturalnie podsuszane w zamkniętym pomieszczeniu do W równoważnej wynoszącej ok. 10%. Była to wilgotność umożliwiająca pomiary spektrometryczne.

Wysuszone próbki łodyg rozdrabniano w młynku analitycznym (Retsch SM 200) z sitem o oczkach 1 mm i przechowywano w woreczkach foliowych. Parametry analizy przybliżonej/proksymalnej, tj. zawartość popiołu (A), części lotnych (VM) i węgla stałego (FC), oznaczano w piecu termograwimetrycznym Eltra Tga-Thermostep. Zawartość A wyznaczano jako masę mineralnej pozostałości po prażeniu próbki w powietrzu w 550°C w ściśle kontrolowanych warunkach, zgodnie z PN-EN ISO 18122:2016-01. VM oznaczano jako ubytek masy (pomniejszony o W próbki analitycznej) powstający podczas ogrzewania próbki w warunkach określonych normą PN-EN ISO 18123:2016-01, odpowiadający frakcji uwalnianej w trakcie kontrolowanej, częściowej pirolizy. FC obliczono pośrednio, zgodnie z podejściem bilansowym, jako: $FC = 100\% - (A + VM)$.

Skład pierwiastkowy oznaczano następująco: zawartość węgla (C), wodoru (H) i siarki (S) metodą instrumentalną opisaną w PN-EN ISO 16948:2015-07, tj. jako zawartość pierwiastków po całkowitym spaleniu/utlenieniu próbki w analizatorze elementarnym (Eltra GmbH CHS-500). Zawartość azotu (N) oznaczono metodą Kjeldahla (mineralizator K-435 i destylarka BUCHI B-324), a zawartość chloru (Cl) miareczkowania potencjometrycznego azotanem (V) srebra (zestaw wyposażony w elektrodę jonoselektywną chlorkową i elektrodę odniesienia; PN-EN ISO 16994:2016-10).

Ciepło spalania (HHV) oznaczano w bombie kalorymetrycznej IKA C2000 metodą dynamiczną przy stałej objętości i temperaturze odniesienia 25°C, zgodnie z PN-EN ISO

18125:2017-07. Norma ta opisuje wyznaczanie HHV w kalorymetrze tlenowym oraz podaje zależności do obliczenia wartości opałowej (LHV). LHV obliczono dla stanu powietrzno-suchego (W = 15%) na podstawie W, HHV i H.

Zawartość substancji rozpuszczalnych w zimnej wodzie (CWE) wyznaczano metodą ekstrakcyjną z użyciem worków filtracyjnych F57 (ANKOM Technology): próbki ekstrahowano wodą destylowaną (20–25°C) przez 48 h, następnie dwukrotnie wypłukano w aparacie ANKOM A200, wysuszono i zważono. CWE obliczono z różnicy masy przed i po ekstrakcji. Analogicznie oznaczono zawartość substancji rozpuszczalnych w gorącej wodzie (HWE), prowadząc ekstrakcję przez 3 h w 100°C. Frakcje włókna detergentowego oznaczono również przy użyciu ANKOM A200. Zawartość nierozpuszczalnej frakcji włókna w roztworze detergentu obojętnego (NDF) grawimetrycznie wg PN-EN ISO 16472:2007, a nierozpuszczalnej frakcji włókna w detergencie kwaśnym (ADF) oraz ligniny detergentowej (ADL) również grawimetrycznie zgodnie z PN-EN ISO 13906:2009. Na podstawie różnic masy obliczono zawartość ligniny (Lig), celulozy (Cel) i hemicelulozy (Hem). Wykorzystując wyniki HWE i NDF, obliczono zawartość pozostałych substancji rozpuszczalnych (OSS) w układzie laurylosiarczanu sodu oraz kwasu etylenodiaminotetraoctowego.

W roku 2023 każdorazowo po zakończeniu hydrodestylacji biokoncentratu odcedzano na sicie laboratoryjnym stałą pozostałość od wywaru/pozostałości wody. Określono jej profil chemiczny w ten sam sposób jak w przypadku łodyg.

3.4. Analizy wskaźników efektywności energetycznej

Podstawą tych badań był trzyletni eksperyment polowy, przy czym nie uwzględniono danych z 2023 roku (przyczynę wskazano w piątym akapicie podrozdziału 3.2.). Dlatego też w niniejszej rozprawie w zakresie wskaźników efektywności energetycznej przedstawiono wyniki poparte analizami statystycznymi z dwóch lat badań (2024, 2025).

Na podstawie metodologii opisanej przez Stolarski i in. (2016; 2017; 2024a) oraz Kwiatkowski i in. (2023) na całkowite nakłady energetyczne (GJ ha^{-1}) związane z produkcją łodyg składały się cztery główne strumienie energii: (I) nakłady energii związane ze zużyciem oleju napędowego; (II) nakłady energii związane ze środkami trwałymi (eksploatacja ciągników, maszyn i urządzeń); (III) nakłady energii związane z materiałami (nasiona i nawozy mineralne); (IV) nakłady energii związane z pracą ludzką. Na podstawie danych literaturowych (Neeft i in. 2011; Stolarski i in. 2024a; Stolarski i in. 2017; Szeptycki i in. 2003) przyjęto następujące współczynniki konwersji energii dla: oleju napędowego

(43,1 MJ kg^{-1}), wapno (1,97 MJ kg^{-1} CaO), nawozy azotowe (48,99 MJ kg^{-1} N), nawozy potasowe (9,68 MJ kg^{-1} K_2O), nawozy fosforowe (15,23 MJ kg^{-1} P_2O_5), nasiona konopi (12 MJ kg^{-1}) oraz nakłady energii związane z użytkowaniem ciągników (125 MJ kg^{-1}), maszyn (110 MJ kg^{-1}) i pracą ludzką (60 MJ h^{-1}). W tab. 7 przedstawiono szczegółowe dane związane z poszczególnymi etapami uprawy i pozyskania sieczki z łodyg.

W związku z tym, że kwiaty były ścinane wcześniej (zawsze w fazie kwitnienia), to w głównej ocenie wartości energetycznej biomasy uwzględniono biomasę w postaci łodyg, która była ważona podczas zbioru roślin. W tym czasie pobierano również próby do oznaczenia jej W, HHV oraz H, na podstawie których obliczono LHV. Następnie obliczono wartość energetyczną łodyg (GJ ha^{-1}) jako iloczyn plonu ich świeżej biomasy (Mg ha^{-1} ś.m.), pozyskanej w momencie zbioru i ich LHV (GJ Mg^{-1} ś.m.) przy roboczej W. W kolejnym etapie obliczono uzysk energii (GJ ha^{-1}) z pozyskanych łodyg jako różnicę pomiędzy ich wartością energetyczną a całkowitymi nakładami energetycznymi związanymi z produkcją łodyg. Na podstawie ilorazu całkowitych nakładów energetycznych do plonu biomasy łodyg wyrażonego w świeżej masie (Mg ha^{-1} ś.m) jak również w suchej masie (Mg ha^{-1} s.m.) obliczono również energochłonność produkcji łodyg (GJ Mg^{-1} s.m. i ś.m.). Obliczono również wskaźnik efektywności energetycznej produkcji łodyg jako iloraz wartości energetycznej łodyg i całkowitego nakładu energetycznego. Powyższe analizy przeprowadzono na podstawie metodologii opisanej przez Stolarski i in. (2016; 2017; 2024a) oraz Kwiatkowski i in. (2023).

Biorąc pod uwagę fakt, że na do biomasy wegetatywnej (otrzymanej ze zbioru w okresie dojrzałości nasion), oprócz łodyg, można zaliczyć biokoncentraty, to w celu zobrazowania pełniejszej wartości energetycznej biomasy przeprowadzono również analizy i obliczenia, w których uwzględniono tę pozostałą (po pozyskaniu nasion) biomasę. W związku z powyższym dodano biomasę biokoncentratów do plonów łodyg, co wpłynęło na wzrost plonu całej biomasy wegetatywnej (bez nasion) oraz na wzrost jej wartości energetycznej. Natomiast dalsze obliczenia związane ze wskaźniki efektywności energetycznej dla całej biomasy wegetatywnej (bez nasion) przeprowadzono analogicznie jak dla łodyg.

Tabela 7. Dane dotyczące etapów produkcji konopi włóknistych w latach prowadzenia doświadczenia.

Operacja	Ciągnik/ sieczkarnia polowa	Masa (kg)	Moc maks./użyta (kW)	Maszyna	Masa (kg)	Czas pracy* (h ha^{-1})	Uwagi
Uprawa pożniwna	Zetor Proxima 80	4470	55,6/41,7	kultywator ścierniskowy KOS	720	0,70	szerokość robocza 2,1 m
Wapnowanie	Zetor Proxima 80	4470	55,6/33,4	rozsiewacz nawozów RNZ	230	0,90	szerokość robocza 12 m
Orka przedzimowa	Zetor Proxima 80	4470	55,6/41,7	pług obracalny IBIS, 3-skibowy	820	0,90	szerokość robocza 1,2 m
Kultywator wczesną wiosną	Zetor Proxima 80	4470	55,6/41,7	kultywator średni	620	0,60	szerokość robocza 2,7 m
Nawożenie przedsiewne NPK	Zetor Proxima 80	4470	55,6/33,4	rozsiewacz nawozów RNZ	230	0,50	szerokość robocza 12 m
Bronowanie przedsiewne	Zetor Proxima 80	4470	55,6/33,4	brona średnia z wałem (np. WUKA, brona 3-sekcyjna „z wałem)	580	0,50	szerokość robocza 3 m
Siew nasion	Zetor Proxima 80	4470	55,6/41,7	siewnik nasienny Famarol S025/3	400	0,50	szerokość robocza 3,0 m
Mechaniczne zwalczanie chwastów (×2)	Ursus C-360	2125	38,2/19,1	kultywator międzyrzędowy P 430/2 (obsypnik / pielnik)	340	2,00	szerokość robocza 3,0 m
Pogłówne nawożenie N	Zetor Proxima 80	4470	55,6/33,4	rozsiewacz nawozów RNZ	230	0,50	szerokość robocza 12 m
Zbiór	John Deere 6630 Premium	5230	95,6/81,3	przyczepiana sieczkarnia polowa Z-374	930	1,90	wydajność polowa ok. 10 Mg/h
Transport rozdrobnionej biomasy (2 zestawy)	Zetor Proxima 80	4470	55,6/38,9	przyczepa T 169/2 (10 Mg)	2270	3,80	ładowność ok. 4 Mg

*czas pracy ludzkiej zwiększono o 0,1 h ha^{-1} dla każdej operacji produkcyjnej z powodu konieczności przygotowania maszyny.

3.5. Analizy statystyczne

Normalność rozkładu analizowanych cech sprawdzono testem Shapiro–Wilka. Następnie zastosowano trójczynnikową analizę wariancji (ANOVA), w której jako czynniki główne przyjęto: odmianę, rok, zbiór kwiatów. Wzięto pod uwagę również interakcje międzyczynnikowe. Dla parametrów wyznaczono średnie arytmetyczne i odchylenia standardowe (SD); dodatkowo dla parametrów łodyg wartości minimalne i maksymalne, kwartyl dolny (Q1), kwartyl górny (Q3) i współczynnik zmienności (CV). Jednorodne grupy określono z użyciem testu wielokrotnych porównań Tukeya przy poziomie istotności $p < 0,05$. W celu oceny, jaka część zmienności danej cechy była wyjaśniana przez poszczególne czynniki i ich interakcje, obliczono udziały tych efektów w całkowitej sumie kwadratów (SS). Zależności pomiędzy wybranymi parametrami przeanalizowano, wyznaczając współczynniki korelacji Pearsona ($p < 0,05$). W aglomeracyjnej analizie skupień metodą hierarchiczną dane wejściowe wystandaryzowano w obrębie kolumn; do aglomeracji zastosowano metodę Warda, jako miarę podobieństwa przyjęto odległość euklidesową, a wyniki zaprezentowano w postaci dendrogramu. Dodatkowo w przypadku składu oraz właściwości łodyg i stałej pozostałości po hydrodestylacji wyznaczono klastry, stosując kryterium Sneath'a (1/3 i 2/3 maksymalnej miary odległości D). Analizę głównych składowych (PCA) przeprowadzono na zestandaryzowanych danych. Rezultaty przedstawiono jako okręgi korelacji zmiennych oraz rzuty przypadków na płaszczyznę PC1–PC2, co umożliwiło ocenę zależności między cechami oraz podobieństwa obiektów. Przy PCA łodyg zmienne obliczane pośrednio bądź stanowiące podzbiory innych zmiennych zostały wykluczone, a na otrzymany wykres wyników (wykres obiektów w przestrzeni składowych) dla interakcji odmiana × rok ręcznie naniesiono okręgi ułatwiające wizualną identyfikację tendencji grupowania próbek.

Dla charakterystyki łodyg w celu jednoczesnej wizualizacji wybranych wartości średnich danych cech dla wszystkich odmian wykonano trójwymiarowy wykres rozrzutu. Dzięki standaryzacji danych dla wybranego zestawu cech stworzono również wykres współrzędnych równoległych; każda polilinia zaprezentowała profil jednej odmiany.

W przypadku stałej pozostałości po hydrodestylacji analiza statystyczna ANOVA była oparta na dwuczynnikowej analizie wariancji, w której czynnikami głównymi były odmiana oraz rodzaj biokoncentratu (próbki biokoncentratu pochodzące z roślin, które w okresie kwitnienia miały zbierane kwiaty oraz próbki z roślin, które w okresie kwitnienia nie miały zbieranych kwiatów).

Jeśli chodzi o wskaźniki energetyczne, to w celu porównania niektórych rozkładów wykonano wykresy skrzypcowe. Posłużono się nimi do obrazowej oceny rozkładu zmiennych, gdyż stanowiły połączenie wykresu empirycznej gęstości prawdopodobieństwa oraz wykresu ramkowego. Wykresy stworzono dla danych surowych (wartości obserwowanych w doświadczeniu), bez agregacji do średnich grupowych, aby zachować pełną informację o zmienności wyników. Na każdym wykresie przedstawiono: krzywą estymatora jądrowego gęstości prawdopodobieństwa oraz jej lustrzane odbicie (kształt „skrzypiec"); poziomy wykres ramkowy (boxplot) osadzony wewnątrz skrzypiec (rozstęp międzykwartylowy); linię mediany (podział ramki); czerwony kwadrat oznaczający wartość średnią; długość wąsów (zakres zmienności poza kwartylami); kształt skrzypiec − gęstość, w tym lokalne poszerzenia (większa koncentracja obserwacji), wydłużone ogony (asymetria/skrajne wartości), ewentualna wielomodalność (więcej niż jeden obszar zwiększonej gęstości).

Analizy wykonano za pomocą STATISTICA 13 (TIBCO Software Inc.).

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Źródła olejków eterycznych

4.1.1. Kwiaty

Najwyższy średni plon kwiatów uzyskano w roku 2024, tj. 0,53 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 8). Był to o ok. 0,08 Mg ha^{-1} s.m większy plon w porównaniu do roku 2025 (tab. 8) i ok. 0,39 Mg ha^{-1} s.m. większy w porównaniu do 2023 (tab. Z1). W roku 2023 po wysiewie nasion (15 maja 2023) nastąpił opad deszczu, a następnie przez okres ok. 30 dni nie obserwowano żadnych opadów (rys. 1). Co zaskakujące, opadów deszczu nie było również od ponad dwóch tygodni przed wysiewem nasion (1 maja−14 maja 2023). Spowodowało to dramatyczne zaniżenie wschodów, czego efektem był m.in. drastycznie niski plon kwiatów. Maj 2023 w porównaniu do maja 2024 i czerwca 2025 (miesiące, w których wysiano nasiona) był najbardziej suchy (tab. 4, rys. 1−3). Skład granulometryczny warstwy ornej w każdym sezonie doświadczalnym odpowiadał piaskowi gliniastemu lekkiemu pylastemu (tab. 1), więc opad 15 maja 2023 prawdopodobnie szybko odparował oraz swobodnie i szybko przemieścił się przez profil glebowy, zasilając tym samym znacznie głębiej położone wody gruntowe. Nałożenie się tych wszystkich czynników mogło skutkować, przy wysokich średnich temperaturach powietrza atmosferycznego (do ok. 20°C w okresie 15−30 maja 2023), brak odpowiednich warunków do wschodów dla wysianych nasion. Tak skrajnie niekorzystne warunki meteorologiczne wpłynęły w konsekwencji nie tylko na jeden z pierwszych określonych parametrów ilościowych jakim był plon kwiatów, ale na wszystkie pozostałe, przez co rok 2023 znacznie odstawał od 2024 i 2025. Dlatego też wyniki dla roku 2023 przedstawiono w rozdziale 8. Załączniki (tab. Z1−Z5). Najwyższy średni plon kwiatów uzyskano z odmiany Białobrzeskie (0,71 Mg ha^{-1} s.m., grupa jednorodna “a”), a najniższy z Finola (0,35 Mg ha^{-1} s.m., “c”) (tab. 8). Plon kwiatów Białobrzeskie był prawie dwukrotnie wyższy w porównaniu do Finola. W całym okresie trzyletniego eksperymentu największy plon odnotowano dla Henola w roku 2024 (0,75 Mg ha^{-1} s.m.). Ogólnie rzecz biorąc, odmiany rodzime (polskie) plonowały najlepiej w aspekcie kwiatów w całym okresie doświadczenia 2023−2025 (tab. 8 oraz tab. Z1).

Tabela 8. Charakterystyka kwiatów w zależności od odmiany, roku oraz interakcji odmiana × rok.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Świeży plon kwiatów (Mg ha^{-1})	W (%)	Plon kwiatów (Mg ha^{-1} s.m.)	Zawartość olejku eterycznego (mL 100 g^{-1} s.m.)	Plon olejku eterycznego (L ha^{-1})
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	2,86 ± 0,45 a	75,20 ± 2,20 ab	0,71 ± 0,13 a	0,24 ± 0,06 a	1,73 ± 0,57 a
	Henola (H)	2,49 ± 0,93 ab	77,66 ± 1,37 a	0,56 ± 0,22 ab	0,19 ± 0,03 ab	1,11 ± 0,60 abc
	Santhica 27 (S27)	1,96 ± 0,72 bc	76,09 ± 2,00 ab	0,48 ± 0,20 bc	0,16 ± 0,05 b	0,69 ± 0,20 c
	Santhica 70 (S70)	1,85 ± 1,24 bc	77,49 ± 1,57 a	0,40 ± 0,24 bc	0,20 ± 0,04 ab	0,86 ± 0,65 bc
	Earlina 8fc (E)	1,99 ± 0,47 bc	77,24 ± 2,40 a	0,45 ± 0,10 bc	0,19 ± 0,02 ab	0,84 ± 0,17 bc
	Kompolti (K)	1,76 ± 0,78 bc	74,07 ± 3,96 b	0,48 ± 0,26 bc	0,26 ± 0,09 a	1,41 ± 1,02 ab
	Finola (F)	1,47 ± 0,96 c	77,42 ± 2,94 a	0,35 ± 0,26 c	0,25 ± 0,08 a	1,03 ± 0,91 bc
Rok (Y)	2024 (24)	2,15 ± 0,87	75,60 ± 2,63 b	0,53 ± 0,22 a	0,24 ± 0,07 a	1,33 ± 0,74 a
	2025 (25)	1,95 ± 0,82	77,30 ± 2,40 a	0,45 ± 0,22 b	0,19 ± 0,05 b	0,86 ± 0,57 b
C × Y	B × 24	2,76 ± 0,55 ab	74,79 ± 1,04 bc	0,70 ± 0,16 ab	0,26 ± 0,06 abc	1,78 ± 0,44 ab
	B × 25	2,96 ± 0,42 ab	75,62 ± 3,24 b	0,72 ± 0,13 ab	0,23 ± 0,08 bc	1,68 ± 0,78 abc
	H × 24	3,25 ± 0,54 a	77,07 ± 1,34 ab	0,75 ± 0,13 a	0,21 ± 0,03 cd	1,59 ± 0,43 abcd
	H × 25	1,72 ± 0,32 cde	78,25 ± 1,35 ab	0,37 ± 0,05 defg	0,17 ± 0,02 cd	0,63 ± 0,15 efg
	S27 × 24	1,33 ± 0,26 def	77,18 ± 2,07 ab	0,31 ± 0,08 efg	0,19 ± 0,04 cd	0,57 ± 0,18 efg
	S27 × 25	2,59 ± 0,21 abc	75,00 ± 1,48 b	0,65 ± 0,05 abc	0,13 ± 0,04 d	0,81 ± 0,16 defg
	S70 × 24	0,81 ± 0,01 efg	76,26 ± 0,11 ab	0,19 ± 0,00 fgh	0,18 ± 0,03 cd	0,34 ± 0,07 fg
	S70 × 25	2,89 ± 0,76 ab	78,72 ± 1,26 ab	0,61 ± 0,14 abcd	0,22 ± 0,03 bcd	1,37 ± 0,49 bcde
	E × 24	2,25 ± 0,39 bcd	78,21 ± 2,32 ab	0,49 ± 0,05 bcde	0,19 ± 0,02 cd	0,93 ± 0,12 cdef
	E × 25	1,72 ± 0,43 cde	76,27 ± 2,49 ab	0,41 ± 0,13 cdef	0,18 ± 0,02 cd	0,74 ± 0,17 efg
	K × 24	2,42 ± 0,32 abc	70,87 ± 1,85 c	0,71 ± 0,10 ab	0,33 ± 0,03 a	2,33 ± 0,13 a
	K × 25	1,10 ± 0,32 ef	77,27 ± 2,23 ab	0,25 ± 0,10 efg	0,19 ± 0,04 cd	0,50 ± 0,28 fg
	F × 24	2,25 ± 0,59 bcd	74,84 ± 0,48 bc	0,57 ± 0,16 abcd	0,31 ± 0,02 ab	1,78 ± 0,57 ab
	F × 25	0,69 ± 0,34 fg	80,00 ± 1,19 a	0,13 ± 0,06 gh	0,19 ± 0,07 cd	0,28 ± 0,23 fg

*a,b,c – grupy jednorodne dla głównych źródeł zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Średni plon kwiatów w badaniach prowadzonych we Włoszech wyniósł 1,57−1,91 Mg ha^{-1} s.m. w zależności od roku (Baldini i in. 2018), a w niniejszym eksperymencie 0,45−0,53 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 8). Jednakże w badaniach włoskich stosowano nawadnianie (w tym eksperymencie nawadniania nie zastosowano). Ponadto we włoskich badaniach gęstość siewu była wyższa (130 vs.. 100 zdolnych do kiełkowania nasion m^{-2}), tak samo jak pH gleby (7,3 vs. 4,7). Włosi kwiaty zebrali w podobnej fazie, przy czym wiechy były ścinane od wysokości pierwszych dolnych kwiatów kwiatostanu (w niniejszym eksperymencie maksymalnie 15 cm od wierzchołka pędu). Skumulowanie się m.in. wymienionych czynników spowodowało różnice w plonie kwiatów. W innym włoskim badaniu najniższy plon wyniósł 1,09 Mg ha^{-1} s.m. dla odmiany Fedora (Vuerich i in. 2019), co stanowi 0,38 Mg ha^{-1} s.m. więcej w porównaniu do najlepiej plonującej w tym badaniu Białobrzeskie (0,71 Mg ha^{-1} s.m.) (tab. 8). Jednakże w zacytowanym badaniu, w przeciwieństwie do niniejszego, m.in. zastosowano nawadnianie, pH gleby było wyższe, zawartość glebowej materii organicznej była wyższa, a sama gleba mniej piaszczysta/mniej lekka. Również w odniesieniu do polskich odmian uprawianych w polskich uwarunkowań klimatycznych otrzymane plony kwiatów były niskie (Białobrzeskie 0,71, a Henola 0,56 Mg ha^{-1} s.m.), gdyż np. Burczyk i in. (2009) dla polskiej odmiany Silesia (przy niemalże identycznej gęstości siewu i na etapie pełnego kwitnienia) otrzymali plon kwiatów równy 2,8 Mg ha^{-1} (przy W = 18%). Jest to najprawdopodobniej efekt słabego stanowiska glebowego w niniejszym doświadczeniu, gdyż stało ono w kontrze do gleby brunatnej wytworzonej z utworów gliniastych, po przedplonie pszenicy ozimej, o pH sięgającym 6,6 (Burczyk i in. 2009).

Zróżnicowanie W było niewielkie o czym świadczyły wyłącznie dwie grupy jednorodne (tab. 8). Najwyższa średnia W była w 2025 (77,30%). W latach poprzednich była zbliżona do tego poziomu: w 2024 niższa o 1,7 punktu procentowego (pp); a w 2023 niższa o 1,8 pp (tab. Z1). Największą rozpiętość średniej wilgotności wynoszącą 12,9 pp odnotowano u Finola (67,07% w 2023 vs. 80,00% w 2025). W innych badaniach wilgotność kwiatów *Cannabis* wskazywana była m.in. na poziomie 80% (Chen i in. 2021), 79% (Addo i in. 2024) czy 70−72% (de Melo i in. 2023).

Świeży plon kwiatów mieścił się w przedziale średnich 1,47−2,86 Mg ha^{-1} w zależności od odmiany (tab. 8). Niemniej jednak rozdział odmian na grupy jednorodne był taki sam jak w przypadku plonu suchego (Mg ha^{-1} s.m.). Campiglia i in. (2017) wskazał świeży plon kwiatów dla Santhica 27 równy 1,29 Mg ha^{-1}, co było niższą wartością w porównaniu do Santhica 27 w niniejszym badaniu (1,96 Mg ha^{-1}) (tab. 8), przy czym zagęszczenie roślin było podobne (odpowiednio 40 i 33 roślin m^{-2}; zagęszczenie roślin przedstawiono

w podrozdziale 4.2.). To warte odnotowania, gdyż gleba w przywołanym doświadczeniu była równie piaszczysta (76,3% piasku vs. 72,1% w niniejszych badaniach, tab. 1) i o porównywalnej zawartości materii organicznej (1,3 vs. 1,4% w niniejszym badaniu, tab. 1). Za różnicę w plonie, oprócz lokalizacji i związanych z nią warunków meteorologicznych, odpowiadać mogło m.in. nawożenie azotowe (łączna dawka N w badaniach Campiglia i in. (2017) była niższa o 70 kg ha^{-1} w porównaniu do niniejszego eksperymentu).

Istotnie najwyższą zawartością olejku eterycznego w kwiatach cechowały się Kompolti, Finola i Białobrzeskie, a więc dwie jedyne odmiany dwupienne oraz polska odmiana jednopienna, która także odznaczyła się najwyższym plonem kwiatów (tab. 8). Utworzyły one grupę "a", w której średnia zawartość olejku eterycznego była na poziomie 0,24−0,26 mL 100 g^{-1} s.m. Najmniej posiadała Santhica 27, która jako jedyna znalazła się w grupie "b" (koncentracja olejku mniejsza o 21−27% względem "a"). Pozostałe odmiany znalazły się pośrodku i nie różniły się istotnie od tych dwóch grup. Co intrygujące, analizując całe trzy lata eksperymentu, najwyższa średnia koncentracja olejku była w roku 2023 (0,25 mL 100 g^{-1} s.m. vs.. 0,24 w 2024 i 0,19 mL 100 g^{-1} s.m. w 2025) (tab. Z1), a zróżnicowanie w obrębie roku wyrażone SD, nie odbiegało od kolejnych dwóch lat. Sezon 2023 był najbardziej suchym w całym trzyletnim okresie doświadczenia, zaś 2025 najbardziej wilgotnym (tab. 4 i 5). Być może to właśnie warunki hydrotermiczne w trakcie sezonu wegetacyjnego, a przede wszystkie w okresie zbioru kwiatów (Finola zbierana najwcześniej – zawsze w lipcu, zaś Kompolti najpóźniej – zawsze we wrześniu), odpowiadały za heterogeniczność zawartości olejku eterycznego w poszczególnych latach. Wyniki zasugerowały, że wilgotniejsze sezony mogą powodować spadki koncentracji olejku eterycznego w kwiatach.

We włoskich badaniach dla ośmiu odmian otrzymano średnie zawartości olejku eterycznego mieszczące się w przedziale 0,2−0,3% (Baldini i in. 2018). W innych włoskich badaniach zawartość kwiatostanach, jako średnia z warunków środowiskowych dla wszystkich odmian, wyniosła 0,25% (Vuerich i in. 2019). Natomiast w niniejszym badaniu dla siedmiu odmian uzyskano przedział 0,16−0,26% (tab. 8). Były to zawartości zbliżone, tym bardziej gdy weźmie się pod uwagę fakt, że zastosowano odmienne odmiany. Również uprawiana w Iranie Fedora na etapie kwitnienia cechowała się zawartością olejku w tym przedziale (0,21%), lecz dwie rodzime populacje (regiony Fars and Yazd; również na etapie kwitnienia) posiadały zawartości dużo wyższe (0,45 i 0,80%) (Abdollahi i in. 2020). Sugeruje to, że rodzime odmiany mogą posiadać wyższe koncentracje, jednak w niniejszym badaniu tak nie było. Polskie odmiany (Białobrzeskie i Henola) nie różniły się w tym aspekcie od zdecydowanej większości pozostałych (wyjątek stanowiła jedynie Santhica 27, która miała istotnie niższą zawartość)

(tab. 8). Warto zaznaczyć, że zawartość olejku eterycznego może istotnie wzrosnąć, kiedy zbiór zostanie opóźniony z pełnego kwitnienia do pełnej dojrzałości roślin (Strzelczyk i in. 2023). W niniejszym eksperymencie zbiór kwiatów miał miejsce na etapie kwitnienia, w związku z czym opóźnienie terminu zbioru, np. do fazy późnego kwitnienia, mogłoby potencjalnie spowodować wyższe uzyski olejku.

Plon olejku eterycznego stanowił wypadkową plonu kwiatów i zawartości olejku eterycznego. Tak też największym średnim plonem hydrodestylatu odznaczyła się Białobrzeskie należąca jako jedyna wyłącznie do grupy „a" (średnia 1,73 L ha^{-1}) (tab. 8). Istotnie najniższa średnia, o 1,03 L ha^{-1} (tj. ok. 60% mniej), była u Santhica 27 ("c"). Drugi najwyższy wynik odnotowano dla Kompolti (1,41 L ha^{-1}, "ab"), jednakże zmienność w przypadku tej odmiany była niemalże dwukrotnie wyższa (SD równe 1,02 L ha^{-1} dla Kompolti vs. 0,57 L ha^{-1} dla Białobrzeskie).

Uzyskano niski plon olejku eterycznego (średnia 0,86−1,33 L ha^{-1} w zależności od roku) w porównaniu do badań włoskich (3,96−4,80 L ha^{-1}) (Baldini i in. 2018). W innych włoskich badaniach najniższy plon uzyskano dla Fedora (2,4 L ha^{-1}) (Vuerich i in. 2019) i było to i tak 0,67 L ha^{-1} więcej w porównaniu do najwydajniejszej w niniejszym eksperymencie Białobrzeskie (1,73 L ha^{-1}). Za niższe plonowanie należy uznać powody, które przytoczono wcześniej przy dyskusji plonu kwiatów. Uzyskane plony były również niższe względem doświadczenia Menghini i in. (2021), gdzie na najmniej żyznej glebie Futura 75 osiągnęła 2,6 L ha^{-1}. Tutaj różnicę mogło również zdeterminować optymalniejsze stanowisko glebowe (57,9% piasku, 26,5% pyłu i 15,6% iłu; neutralne pH = 6,9). Ponadto w zacytowanym badaniu ścinano 30 cm górnej część łodygi a nie 15 cm; a także kwiaty zbierane były później – na początku dojrzewania nasion, przez co miały większą masę niż na etapie kwitnienia.

4.1.2. Biokoncentrat

Odmiana zróżnicowała wszystkie parametry biokoncentratu (pozostałości po młóceniu, na którą składają się liście, kwiaty, zielone i brunatne kielichy/podsadki tworzące okrywę orzeszków, zielone kielichy/podsadki z niedojrzałymi orzeszkami, puste orzeszki i nasiona, drobne gałązki stanowiące osie kwiatostanów oraz fragmenty włókna i paździerzy; fot. 1), tj. plon, wilgotność przed hydrodestylacją, zawartość olejku eterycznego oraz plon olejku eterycznego (tab. 9). Rok nie miał wpływu jedynie na zawartość olejku eterycznego, natomiast zbiór kwiatów nie wpłynął na żadną z jego przeanalizowanych cech. Spośród wszystkich interakcji najbardziej wyraźnie na parametry biokoncentratu wpłynęła interakcja odmiana × rok. Zdeterminowała ona bowiem trzy spośród czterech jego przeanalizowanych cech, w tym najbardziej kluczową w kwestii zarządzania/praktycznej, czyli plon olejku eterycznego.



Fotografia 1. Pozyskane z uprawy konopi włóknistych źródła olejków eterycznych – kwiat w okresie kwitnienia oraz świeży biokoncentrat (przed suszeniem i odseparowaniem nasion); 2025 rok.

Tabela 9. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych źródeł zmienności (w tym interakcji) oraz cech.

Cecha	Odmiana (C)	Rok (Y)	Zbiór kwiatów (F)	C × Y	C × F	Y × F	C × Y × F
Plon świeżych kwiatów	<0,001*	0,131	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,131	<0,001*
Wilgotność kwiatów	0,005*	0,003*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,003*	<0,001*
Plon kwiatów	<0,001*	0,020*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,020*	<0,001*
Zawartość olejku eterycznego w kwiatach	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,005*	<0,001*	<0,001*	0,005*
Plon olejku eterycznego z kwiatów	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
Plon biokoncentratu	0,007*	<0,001*	0,478	0,429	0,364	0,014*	0,224
Wilgotność biokoncentratu przed hydrodestylacją	<0,001*	<0,001*	0,447	0,000*	0,504	0,426	0,213
Zawartość olejku eterycznego w biokoncentracie	<0,001*	0,741	0,571	0,001*	0,666	0,723	0,866
Plon olejku eterycznego z biokoncentratu	<0,001*	<0,001*	0,261	0,007*	0,515	0,029*	0,287
Wysokość roślin	<0,001*	0,644	0,066	<0,001*	0,808	0,310	0,828
Średnica roślin	<0,001*	0,013*	0,020*	<0,001*	0,491	0,264	0,312
Obsada roślin	<0,001*	<0,001*	0,617	0,001*	0,599	0,297	0,928
Udział roślin męskich	<0,001*	0,002*	0,904	<0,001*	0,447	0,448	0,545
Plon świeżej biomasy	<0,001*	0,004*	0,103	<0,001*	0,523	0,191	0,915
Wilgotność biomasy	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,426	0,566	0,926
Plon biomasy	<0,001*	<0,001*	0,617	0,001*	0,599	0,297	0,928
Całkowity plon biomasy	<0,001*	<0,001*	0,112	0,001*	0,617	0,346	0,934
Całkowity plon olejku eterycznego	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,008*	0,071	<0,001*
Plon nasion	<0,001*	<0,001*	0,045*	<0,001*	0,003*	0,003*	0,007*

* wartości istotne statystycznie ($p < 0,05$).

Pod względem plonu biokoncentratu wartości średnie dla odmian zmieściły się w przedziale od 0,68 do 1,06 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 10). Istotnie najwyższy plon uzyskano z Henola (grupa „a"), a najniższy z Finola („b"). Różnica wynosiła 0,38 Mg ha^{-1} s.m., tj. ok. 36%. Pozostałe odmiany miały wartości pośrednie. Średni plon dla 2025 był niemal dwukrotnie wyższy w porównaniu do roku 2024 (1,16 vs.. 0,58 Mg ha^{-1} s.m.), przy czym jego zróżnicowanie było mniejsze (0,31 vs.. 0,18 Mg ha^{-1} s.m.). Rok 2023, co może wydawać się paradoksalne, odznaczył się wartością pośrednią plonu biokoncentratu, tj. 0,96 Mg ha^{-1} s.m. Jednakże biokoncentrat nie był młócony poprzez kombajn, lecz był odseparowywany ręcznie od pędów oraz z całej ich długości. Ponadto ręczna separacja była procesem dokładniejszym i zmniejszała straty procesowe, jednakże wymagała znacznie więcej czasu i wysiłku. Zbiór kwiatów w okresie kwitnienia nie wpłynął istotnie na uzyski biokoncentratu. Najwięcej biokoncentratu w latach 2024−2025 otrzymano z odmiany Kompolti w roku 2024 (1,29 Mg ha^{-1} s.m.).

Burgel i in. (2020) wykazali, że omłotowe pozostałości kwiatostanów pozyskane podczas zbioru na nasiona zapewniły plon sięgający 200 g m^{-2} (tj. 2 Mg ha^{-1}), co odpowiada niemal dwukrotności średniego plonu biokoncentratu uzyskanego w przypadku najwydajniejszej odmiany Henola (1,06 Mg ha^{-1} s.m.; tab. 10). Sugier i in. (2025) wykazali, że plon całych owocostanów po omłocie (w tym łodyg, pędów bocznych, liści i przysadek) u odmiany Finola wyniósł 2,03 Mg ha^{-1} s.m., podczas gdy plon wyłącznie przysadek i liści 1,16 Mg ha^{-1} s.m. Natomiast w niniejszym badaniu średni plon biokoncentratu dla tej samej odmiany był równy 0,68 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 10). Pomijając efekt żyźniejszego i o wyższym pH stanowiska glebowego u Sugier i in. (2025), wyższy plon wynikać może również z tego, że w ich badaniach owocostany zebrano poprzez odcięcie górnej część łodygi rośliny na wysokości pierwszej dolnej gałęzi bocznej owocostanu. Natomiast w naszych badaniach odcinano tylko górne części pędów z wiechami, na których zlokalizowana była największa masa kwiatów. Warto również podkreślić, że nasiona konopi/biokoncentrat można zbierać w jednym, dwóch lub trzech etapach (Assirelli i in. 2020). W niniejszym doświadczeniu były to trzy etapy (ścinanie łodyg, młócenie, odseparowanie nasion), co wiąże się ze stratami procesowymi (związków lotnych czy biomasy) wynikającymi z manipulowania materiałem na każdym etapie. Ten czynnik również mógł obniżyć plon w stosunku do przetwarzania konopi, w którym wszystko wykonywane jest ręcznie.

Tabela 10. Charakterystyka biokoncentratu w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Plon biokoncentratu (Mg ha^{-1} s.m.)	W przed hydrodestylacją (%)	Zawartość olejku eterycznego (mL 100 g^{-1} s.m.)	Plon olejku eterycznego (L ha^{-1})
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	0,90 ± 0,36 ab	15,76 ± 6,48 a	0,08 ± 0,02 c	0,73 ± 0,44 bc
	Henola (H)	1,06 ± 0,29 a	12,36 ± 2,88 b	0,10 ± 0,02 a	1,02 ± 0,28 a
	Santhica 27 (S27)	0,80 ± 0,32 ab	12,23 ± 3,38 b	0,03 ± 0,01 d	0,24 ± 0,12 d
	Santhica 70 (S70)	0,85 ± 0,40 ab	12,45 ± 3,41 b	0,03 ± 0,01 d	0,24 ± 0,13 d
	Earlina 8fc (E)	0,86 ± 0,43 ab	11,60 ± 1,47 b	0,09 ± 0,01 ab	0,79 ± 0,37 ab
	Kompolti (K)	0,93 ± 0,43 ab	13,10 ± 3,24 b	0,08 ± 0,01 bc	0,74 ± 0,33 b
	Finola (F)	0,68 ± 0,44 b	12,28 ± 1,76 b	0,07 ± 0,01 c	0,48 ± 0,34 cd
Rok (Y)	2024 (24)	1,16 ± 0,31 a	10,11 ± 0,69 b	0,07 ± 0,03	0,80 ± 0,41 a
	2025 (25)	0,58 ± 0,18 b	15,54 ± 3,41 a	0,07 ± 0,03	0,41 ± 0,28 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem kwiatów (FH)	0,85 ± 0,34	12,98 ± 4,18	0,07 ± 0,03	0,58 ± 0,34
	bez zbiorów kwiatów (NFH)	0,89 ± 0,43	12,67 ± 3,11	0,07 ± 0,03	0,63 ± 0,46
C × Y	B × 24	10,74 ± 0,87 cd	1,21 ± 0,24 a	0,09 ± 0,00 ab	1,11 ± 0,25 a
	B × 25	20,78 ± 5,58 a	0,59 ± 0,09 cd	0,06 ± 0,02 c	0,36 ± 0,13 cde
	H × 24	9,78 ± 0,20 d	1,27 ± 0,22 a	0,09 ± 0,02 ab	1,13 ± 0,36 a
	H × 25	14,93 ± 1,52 b	0,86 ± 0,16 abc	0,11 ± 0,01 a	0,91 ± 0,10 ab
	S27 × 24	9,17 ± 0,49 d	1,07 ± 0,22 ab	0,03 ± 0,00 d	0,34 ± 0,10 cde
	S27 × 25	15,29 ± 1,55 b	0,53 ± 0,08 cd	0,03 ± 0,01 d	0,14 ± 0,03 e
	S70 × 24	9,81 ± 0,21 d	1,18 ± 0,29 a	0,03 ± 0,01 d	0,33 ± 0,12 cde
	S70 × 25	15,10 ± 2,97 b	0,52 ± 0,06 cd	0,03 ± 0,01 d	0,14 ± 0,04 e
	E × 24	10,36 ± 0,21 cd	1,08 ± 0,52 ab	0,09 ± 0,01 ab	0,97 ± 0,43 ab
	E × 25	12,84 ± 1,01 bcd	0,64 ± 0,16 bcd	0,09 ± 0,02 ab	0,60 ± 0,20 bcd
	K × 24	10,17 ± 0,24 cd	1,29 ± 0,30 a	0,08 ± 0,01 bc	1,01 ± 0,24 ab
	K × 25	16,04 ± 1,56 b	0,57 ± 0,06 cd	0,08 ± 0,01 abc	0,47 ± 0,07 cde
	F × 24	10,74 ± 0,60 cd	1,05 ± 0,32 ab	0,07 ± 0,02 bc	0,74 ± 0,31 abc
	F × 25	13,82 ± 0,88 bc	0,31 ± 0,04 d	0,07 ± 0,01 bc	0,23 ± 0,05 de

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Przed hydrodestylacją W były do siebie zbliżone i nigdy wartość średnia nie przekroczyła 15,76% (tab. 10 i tab. Z2). To ważne, gdyż wysoka wilgotność materiału przed hydrodestylacją mogłyby świadczyć o złych warunkach przechowywania, degradacji biokoncentratu, a tym samym spadku zawartości olejku eterycznego.

Istotnie najwyższa średnia zawartość olejku była w polskiej odmianie Henola i wynosiła 0,10 mL 100 g^{-1} s.m. (grupa „a") (tab. 10). Stanowiło to ponad 230% więcej w porównaniu do grupy „d" tworzonej przez francuskie odmiany biomasowe/włókniste Santhica 27 i Santhica 70. Biorąc pod uwagę dedykowanie danych odmian produkcji konkretnych surowców, zaskoczeniem była jedynie o 20% niższa w porównaniu do Henola zawartość olejku u Kompolti i Białobrzeskie (również odmiany wysokie zalecane do produkcji m.in. włókna). W 2023 roku biokoncentrat posiadał w sobie więcej hydrodestylatu (średnio 0,09 mL 100 g^{-1} s.m., tab. Z2), lecz było to najpewniej rezultatem ręcznej separacji (biokoncentrat praktycznie w całości wolny od włókna czy/i paździerza) niż najbardziej suchych warunków i niskiej obsady w roku 2023. Rozrzuty zawartości olejku w latach 2024−2025 jak i w całym okresie eksperymentu 2023−2025 nie przekroczyły 33,3% (taka maksymalna wartość była np. dla interakcji Białobrzeskie × 2025, tab. 10).

Niniejsze badanie potwierdziło, że pozostałości po młóceniu, będące produktem ubocznym oddzielania nasion, można wykorzystać do ekstrakcji olejku eterycznego (Spampinato i in. 2024, Balndinieres i Amaducci 2023). W badaniach Ascrizzi i in. (2019) zawartość olejku w pozostałościach po omłocie wyniosła 0,01−0,12% w zależności od lokalizacji i terminu zbioru (dla odmiany Fedora 17). Wydajność w niniejszym badaniu była podobna, 0,03−0,10% w zależności od odmiany (tab. 10). Jednakże w porównaniu do olejku z całych owocostanów po omłocie (w tym łodygi, pędy boczne, liście i podsadki) czy wyłącznie podsadek i liści była niższa (odpowiednio 0,16−0,22 i 0,27−0,33%; odmiana Finola; lokalizacja: Polska) (Sugier i in. 2025). Wyższe zawartości w badaniach Sugier i in. (2025) wynikają m.in. z braku w tych dwóch frakcjach pustych orzeszków, pustych nasion i nasion lub fragmentów włókna i paździerza (biokoncentrat w niniejszym eksperymencie je posiadał). Ponadto w badaniach Sugier i in. (2025) młócono ręcznie (młócenie kombajnem wiąże się z manipulowaniem biokoncentratem, które może powodować straty frakcji lotnych czy biomasy, a zatem też olejku).

Finalnie największym średnim plonem olejku odznaczyła się Henola (1,02 L ha^{-1}, grupa "a"), a drugi największy plon miała Earlina 8fc (0,79 L ha^{-1}, „ab"). Te dwie cultivars wraz z Finola zaliczają się tzw. odmian nasiennych czy też kwietno-nasiennych (a zatem posiadających dobrze rozwinięte i bujne kwiatostany, które powinny stanowić w głównej

mierze ich biokoncentrat). Pewne odstępstwo stanowi zatem niski plon olejku dla Finola (0,48 L ha^{-1}, “cd”), co z pewnością było rezultatem niskiego plonowania i słabego radzenia sobie w warunkach doświadczenia tej odmiany. Istotnie najniższy plon miały Santhica 27 i Santhica 70 (obie 0,24 L ha^{-1}, “d”) (tab. 10), czyli francuskie odmiany włókniste/biomasowe. Ich biokoncentrat posiadał w swoim składzie morfologicznie m.in. więcej frakcji włókna i paździerza, a także nie był tak organoleptycznie aromatyczny jak pozostałych odmian. Pomijając najgorzej plonujące odmiany, Henola oprócz największego plonu zaoferowała także jego największą stabilność (SD = 0,28 L ha^{-1}, tab. 10). Zasadniczo rok 2024 był bardziej wydajny w porównaniu do 2025 (0,80 vs. 0,41 L ha^{-1}). W roku 2023 średni plon olejku był najwyższy (0,93 L ha^{-1}), jednak, tak jak podkreślono wcześniej, tego wyniku nie można obiektywnie skonfrontować z 2024 i 2025. W 2023, w przeciwieństwie do pozostałych lat, frakcję biokoncentratu pozyskano z pędów w sposób ręczny, czego efektem była niższa zawartość włókna i paździerza. Ponadto biokoncentrat został odseparowany z całej długości pędów a nie tylko z ich górnych części. Taki schemat postępowania sprawił, że biokoncentrat zawierał w sobie m.in. więcej frakcji kwiatów i liści. Prawdopodobnie również brak wymłócenia przez kombajn spowodował mniejsze straty lotnych frakcji (młócenie kombajnem generuje m.in. oddziaływanie podwyższonych temperatur na ten biosurowiec, a składniki olejku należą do lotnych związków chemicznych). Jest to z pewnością pewna wskazówka praktyczna dla mniejszych gospodarstw rolnych, gdyż sugeruje możliwość zrekompensowania braku mechanizacji, a tym samym zrefundowania wyższych nakładów pracy fizycznej. Z drugiej strony tak skrajnie suche warunki jak w roku 2023 fascynują pod względem ich wpływu na plon olejku z biokoncentratu i prowokują ku przyszłym badaniom w zakresie wskazanych powyżej aspektów.

Sugier i in. (2025) ocenili plon olejku eterycznego otrzymanego z całych owocostanów po omłocie (w tym łodyg, pędów bocznych, liści i podsadek), a także z wyodrębnionych podsadek i liści. W pierwszym przypadku plon dla odmiany Finola wyniósł 3,9, a w drugim 3,5 L ha^{-1}. Odbiegając od wcześniej przytoczonych już powodów wyższego plonowania, bardzo dobrze różnicę w plonie oddaje finalna wysokość roślin. Sugier i in. (2025) owocostany zebrali z Finola, które miały wysokość co najmniej 2,4 m, a tymczasem w naszym badaniu Finola osiągnęła jedynie ok. 1,2 m (biometrię opisano w podrozdziale 4.2.). Finola to odmiana, w której wiecha obejmuje większą część długości pędu, zatem już sama wysokość roślin wskazuje pewien potencjał dla plonu olejku eterycznego (dla mniejszych wysokości zakładać należy, że będzie on mniejszy). W niniejszym badaniu skupiono się na olejku eterycznym,

jednakże istnieje możliwość ekstrahowania pozostałości po omłocie/biokoncentratu heksanem, dichlorometanem, octanem etylu czy etanolem, i również określenia plonu (Mahou i in. 2025).

4.2. Biometria oraz obserwacje fenologiczne

Najwyższą średnią wysokość osiągnęła Kompolti (ok. 313 cm, tab. 11), a więc odmiana o najdłuższym cyklu rozwojowym wynoszącym 157 dni (tab. 6). W tej samej grupie jednorodnej „a" znalazła się Santhica 70, która osiągnęła średnio prawie 304 cm. Jednocześnie te dwie odmiany odznaczyły się największym zróżnicowaniem wysokości (33,82 i 32,95 cm, odpowiednio). Najniższa była Finola, czyli odmiana o najkrótszym cyklu rozwojowym, która jako jedyna znalazła się w grupie „d". Różnica między nią a pierwszą grupą wyniosła 183−191 cm, tj. 151−158%. Ogólnie rzecz biorąc odmiany kwietno-nasienne (Finola, Henola, Earlina 8fc, o najkrótszych cyklach rozwojowych) były najniższe i znalazły się w grupach „c" i „d". Lata 2024 i 2025 nie wykazały istotnego zróżnicowania pod względem wysokości (ok. 227 i 225 cm, odpowiednio), przy czym w roku 2024 były mniej stabilne (SD wynoszące prawie 93 cm). Natomiast rok 2023 odbiegał znacząco pod względem wysokości (96−98 cm różnicy, tj. 75−76% w odniesieniu do lat 2024−2025, tab. Z3). Zbiór kwiatów w okresie kwitnienia spowodował średnio niższą finalną wysokość, jednakże nie była to różnica istotna (ok. 222 vs. ok. 231 cm). Rozbijając poszczególne odmiany na lata rekordem w doświadczeniu była średnia wysokość równa ok. 334 cm (Kompolti × 2024). Poniżej przedstawiono fotografie obrazujące doświadczenie w kolejnych latach eksperymentu (fot. 2−4).



Fotografia 2. Fragment doświadczenia w roku 2023 (23 sierpnia; widoczne kolejno od lewej siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Santhica 70, Kompolti, Henola, Santhica 27, Finola, Białobrzeskie, Earlina 8 fc).



Fotografia 3. Fragment doświadczenia w roku 2024 (12 lipca; widoczne kolejno od lewej pierwsze siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Kompolti, Earlina 8fc, Finola, Santhica 70).



Fotografia 4. Fragment doświadczenia w roku 2025 (10 września; widoczne kolejno od lewej siedem poczwórnych rzędów to odmiany: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Kompolti, Earlina 8fc, Finola, Santhica 70).

Finalna wysokość odmiany Finola wyniosła 121 cm (tab. 11) przy długości cyklu rozwojowego wynoszącego 107 dni (tab. 6). Dobrze obrazuje to ograniczenia stanowiska glebowego i/lub warunków meteorologicznych, gdyż w alpejskiej włoskiej dolinie uzyskano 150 cm w 75 dniu uprawy tej samej odmiany; przy czym zaznaczyć należy, że zastosowano mniejsze odległości międzyrzędzi (0,1 m vs. 0,4 m w niniejszym badaniu) (Pavlovic i in. 2023). W doświadczeniach z konopiami przemysłowymi wyższe rośliny uzyskuje się przy węższych/mniejszych rozstawach (Viskovic i in. 2024). W badaniach Campbell i in. (2025) określono wysokość 13 odmian konopi przemysłowych w fazie dojrzałości, przy czym średnie wysokości wyniosły 113−210 cm w zależności od odmiany; jednocześnie odmiany dojrzewające później były wyższe. Ta druga zależność została potwierdzona również w niniejszym badaniu. Natomiast przedział średnich wysokości, mimo zastosowania w niniejszym badaniu niższej gęstości siewu i szerszych międzyrzędzi, był większy i wyniósł 121−313 cm w zależności od odmiany (tab. 11). Zatem różnicę musiały spowodować inne czynniki, np. dobrane genotypy (Białobrzeskie jako jedyna znalazła się w obu doświadczeniach), szerokość geograficzna czy warunki meteorologiczne.

Tabela 11. Charakterystyka cech biometrycznych w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Wysokość (cm)	Średnica (mm)	Zagęszczenie roślin/obsada (roślin ha^{-1})	Udział osobników męskich (%)
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	251,33 ± 17,23 b	9,88 ± 1,50 bc	527083 ± 132909 a	0,04 ± 0,09 c
	Henola (H)	146,83 ± 32,01 cd	8,40 ± 2,41 cd	373177 ± 147699 b	0,30 ± 0,25 c
	Santhica 27 (S27)	275,00 ± 24,50 b	11,18 ± 1,32 b	331424 ± 79668 b	0,02 ± 0,08 c
	Santhica 70 (S70)	303,83 ± 32,95 a	15,01 ± 2,83 a	169184 ± 102734 c	2,35 ± 1,06 c
	Earlina 8fc (E)	172,50 ± 19,67 c	8,08 ± 1,27 d	387500 ± 127384 b	0,25 ± 0,28 c
	Kompolti (K)	312,58 ± 33,82 a	16,04 ± 2,16 a	204774 ± 103223 c	32,56 ± 5,97 b
	Finola (F)	121,17 ± 25,90 d	7,76 ± 1,73 d	329774 ± 211882 b	36,81 ± 5,83 a
Rok (Y)	2024 (24)	227,29 ± 92,79	10,54 ± 4,17 a	402951 ± 187295 a	11,27 ± 17,32 a
	2025 (25)	225,07 ± 59,43	11,28 ± 3,10 b	260739 ± 118235 b	9,39 ± 14,38 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem kwiatów (FH)	221,71 ± 75,38	10,56 ± 3,65 b	335293 ± 167989	10,37 ± 15,91
	bez zbiorów kwiatów (NFH)	230,64 ± 80,13	11,25 ± 3,71 a	328398 ± 176559	10,30 ± 16,00
C × Y	B × 24	256,00 ± 18,70 cd	9,42 ± 1,45 def	647049 ± 53010 a	0,03 ± 0,07 c
	B × 25	246,67 ± 15,86 d	10,35 ± 1,53 cde	407118 ± 38889 cd	0,04 ± 0,11 c
	H × 24	121,17 ± 16,09 fg	6,45 ± 0,99 g	505903 ± 48786 bc	0,29 ± 0,26 c
	H × 25	172,50 ± 20,33 e	10,35 ± 1,63 cde	240451 ± 57740 f	0,31 ± 0,26 c
	S27 × 24	289,33 ± 21,23 bcd	11,82 ± 1,44 cd	268924 ± 38838 f	0,00 ± 0,00 c
	S27 × 25	260,67 ± 19,42 cd	10,53 ± 0,89 cde	393924 ± 55498 de	0,05 ± 0,11 c
	S70 × 24	324,00 ± 32,02 ab	17,35 ± 1,98 a	79340 ± 19976 g	2,39 ± 1,45 c
	S70 × 25	283,67 ± 19,67 bcd	12,67 ± 0,71 bc	259028 ± 58718 f	2,30 ± 0,62 c
	E × 24	163,00 ± 14,76 ef	7,50 ± 0,85 fg	494618 ± 55557 bcd	0,43 ± 0,27 c
	E × 25	182,00 ± 20,42 e	8,67 ± 1,43 efg	280382 ± 71232 f	0,06 ± 0,16 c
	K × 24	333,83 ± 27,04 a	14,75 ± 0,97 ab	295313 ± 41014 ef	34,30 ± 6,25 b
	K × 25	291,33 ± 26,49 abc	17,33 ± 2,30 a	114236 ± 45670 g	30,81 ± 5,66 b
	F × 24	103,67 ± 17,20 g	6,47 ± 0,86 g	529514 ± 33668 b	41,46 ± 2,33 a
	F × 25	138,67 ± 21,11 efg	9,05 ± 1,36 efg	130035 ± 43393 g	32,17 ± 4,20 b

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Średnica zmieściła się w przedziale średnich 7,76−16,04 mm w zależności od odmiany (tab. 11). Różnica między grupą „a" i „d" wyniosła 43−55%. Największymi średnicami, tak jak w przypadku wysokości, odznaczyły się Kompolti i Santhica 70 (średnia 16,04 i 15,01 mm, odpowiednio). Znów wystąpiła ta sama zależność: odmiany włókniste/biomasowe miały grubsze łodygi w porównaniu do odmian, które można określić jako kwietno-nasienne. Pomiędzy latami 2024 i 2025, w przeciwieństwie do wysokości, wystąpiła istota różnica (10,54 i 11,28 mm, odpowiednio). W 2023 było to średnio 0,71−1,45 mm mniej, tj. 6−14% (tab. Z3). Zbiór kwiatów istotnie zmniejszył średnice, o 0,74 mm (7%).

Należy zaznaczyć, że średnicę różnicuje rozstawa/szerokość międzyrzędzi i tak w badaniach Viskovic i in. (2024) rośliny wysiane w rozstawie 0,5 m wykazały istotny wzrost grubości w porównaniu do roślin w rozstawie 0,125 m. Morfologię różnicuje także gęstość siewu; im jest wyższa, tym konopie rozwijają cieńsze łodygi z mniejszą liczbą gałęzi bocznych (Fike i in. 2017). Te dwa parametry kształtują właśnie zagęszczenie/obsadę roślin, która jest warunkowana też przez inne czynniki środowiskowe (Rehman i in. 2021, Williams i in. 2024) co potwierdzono w tym badaniu (zbiór kwiatów czy rok/sezon wegetacyjny istotnie zróżnicowały średnicę, tab. 11). W niniejszym doświadczeniu odmiana (cecha niezależna od środowiska) rozbił ją na cztery grupy jednorodne.

Obsada roślin była wyraźnie największa u Białobrzeskie, 527083 roślin ha^{-1} (grupa "a"), a najmniejsza u Santhica 70 i Kompolti, 169184 i 204774 roślin ha^{-1} ("c"), odpowiednio (tab. 11). Między latami wystąpiła znacząca różnica. W roku 2024 była największa (402951 roślin ha^{-1}), a w 2025 mniejsza o 35%. W 2023 jeszcze mniejsza, o aż 71% (tab. Z3). Sezon wegetacyjny 2024 był zatem najbardziej optymalny pod względem wschodów. Warunki meteorologiczne w połączeniu z obsadą roślin wskazują, że w analizowanych warunkach glebowych rok 2023 był zbyt suchy, zaś 2025 zbyt wilgotny (tab. 4 i 5). Największe zagęszczenie roślin uzyskano dla interakcji Białobrzeskie × 2024 (647049 roślin ha^{-1}).

Gęstość siewu różnicuje zagęszczenie roślin i teoretycznie przy wysiewie 60 kg nasion ha^{-1} można otrzymać 188–259 roślin m^{-2} (Stramkale i in. 2024), czyli prawie 300−400% więcej niż najlepszy wynik uzyskany w niniejszym doświadczeniu (przy gęstości siewu 15 kg nasion ha^{-1}, tab. 11). Jednakże to tylko teoria, gdyż w niniejszym doświadczeniu zawsze wysiewano 100 nasion m^2 (w przeliczeniu na nasiona kiełkujące w warunkach laboratoryjnych), a zagęszczenie wyniosło średnio 16–52 roślin m^{-2} w zależności od odmiany (tab. 11). Sam maksymalny rozrzut dla jednej odmiany wyniósł 21 roślin m^{-2}. Zatem to nie tylko gęstość siewu, ale też genotyp i środowisko kształtują finalną obsadę. W niniejszym doświadczeniu nie osiągnięto optimum zagęszczenia roślin dedykowanej dwukierunkowej uprawie konopi

(pędy/biomasa i nasiona), które Tang i in. (2017) określili jako 90–150 roślin m^{-2}. Zgodnie z literaturą obsady, które uzyskano w niniejszym doświadczeniu pogarszają delikatność włókna i praktyczność zbioru (grubsze pędy) (Tang i in. 2017). Z drugiej strony wg Deng i in (2019), aby uzyskać plony włókna o wysokiej jakości, optymalny zakres obejmuje gęstość siewu (traktowaną jako docelową obsadę) 32–37 roślin m^{-2}. Takie zagęszczenia roślin osiągnęły Henola, Santhica 27 i Finola (tab. 11).

Udział osobników męskich był oczywiście największy u odmian dwupiennych, czyli Kompolti oraz Finola, osiągając 32,56 (grupa „b") i 36,81% („a"), odpowiednio (tab. 11). W jednopiennych odznaczyła się jedynie Santhica 70, w obrębie której udział wyniósł 2,35%, co może świadczyć o niepełnej stabilizacji jednopienności podczas hodowli. Być może w trakcie tego procesu nie prowadzono całkowitej negatywnej selekcji osobników męskich, w wyniku czego w niniejszym doświadczeniu odnotowano względnie wysokie wśród odmian jednopiennych „rozszczepienie" cechy płci (rewersję ku dwupienności). W latach 2024−2025 udział dla Finola wynosił 32,17−41,46%, zaś dla Kompolti 30,81−34,30% (tab. 11). Najbardziej suchy rok 2023 odbiegł od tych przedziałów, kiedy to dla Finola udział ten wyniósł 24,04%, zaś dla Kompolti 41,46% (tab. Z3). Warunki meteorologiczne w trakcie sezonu wegetacyjnego mogły mocno determinować płeć i tak też prawdopodobnie było w roku 2023, przy czym charakter zmiany proporcji mógł zależeć od odmiany (u Finola zaobserwowano zmniejszony udział osobników męskich, zaś u Kompolti zwiększony względem 2024−2025).

W odmianach dwupiennych stosunek roślin żeńskich do męskich wahał się od 0,7 do 1,8 (Ruzgas i in. 2024). W tym doświadczeniu osiągnięto w przybliżeniu stosunek od 1,7 (Finola) do 2,1 (Kompolti) (tab. 11), co rozszerza ww. przedział. Należy zdawać sobie sprawę, że pomimo obecności chromosomów płci, niektóre rośliny dwupienne wytwarzają kwiaty o płci przeciwnej do płci głównej. Ta anomalia kwitnienia jest uwarunkowana czynnikami zewnętrznymi, np. fotoperiodem (Faux i in. 2016). Z tego też względu mogło dojść do rozszerzenia wskazanego przedziału. Odmiany jednopienne produkują ok. 70–85% roślin żeńskich, przy czym uprawiana wyłącznie jedna jednopiennej odmiana może składać się z wielu fenotypów, które charakteryzują się różnym stosunkiem kwiatostanów żeńskich do o męskich (Ruzgas i in. 2024). Ten eksperyment polegał na określaniu udziału osobników w całości męskich. Odmiany jednopienne bywają wrażliwe na warunki środowiskowe i mają tendencję do powrotu do ekspresji dwupiennej pod wpływem stresu (Thongplew i in. 2025). Być może to właśnie czynniki stresowe, np. grunt marginalny, spowodowały podwyższony procentowy udział osobników męskich u Santhica 70 (tab. 11).

Najdłuższym cyklem rozwojowym odznaczyła się Kompolti (średnio 157 dni), a najkrótszym Finola (107 dni, tab. 6). Ogólnie rzecz biorąc odmiany określane jako włókniste/biomasowe (Białobrzeskie, Santhica 27, Santhica 70, Kompolti) odznaczyły się dłuższym cyklem rozwojowym (142−157 dni) w porównaniu do odmian charakteryzowanych jako kwietno-nasienne (Henola, Earlina 8fc i Finola; 107−127 dni) o 15−50 dni. Kwitnienie, w okresie którego miał miejsce zbiór kwiatów, przypadł od ok. połowy lipca do ok. pierwszej połowy września, w zależności od odmiany oraz roku (tab. 12). Późne kwitnienie/początek dojrzewania nasion miał z kolei miejsce od drugiej połowy lipca do końca września i również był zależny od tych samych czynników. To ważny aspekt pod kątem planowania zbioru kwiatów, gdyż zależy on nie tylko od odmiany i roku, ale również od fazy fenologicznej. W tym doświadczeniu kwiaty zbierano podczas kwitnienia, natomiast istnieje możliwość zbioru również w terminie późniejszym, np. we wspomnianym późnym kwitnieniu.

Tabela 12. Terminy obserwowanych faz fenologicznych (daty podano w następującej kolejności: 2023 r.; 2024 r.; 2025 r.).

Odmiana	Początek kwitnienia	Kwitnienie	Późne kwitnienie/ początek dojrzewania nasion	Dojrzewanie nasion
Białobrzeskie	05.08; 03.08; 12.08	16.08; 08.08; 19.08	02.09; 13.09; 02.09	26.09; 22.09; 20.10
Henola	21.07; 09.07; 31.07	19.07; 12.07; 04.08	29.07; 26.07; 14.08	05.09; 27.08; 23.09
Santhica 27	05.08; 03.08; 12.08	16.08; 09.08; 19.08	02.09; 13.09; 02.09	25.09; 29.09; 30.10
Santhica 70	11.08; 07.08; 17.08	24.08; 12.08; 02.09	05.09; 13.09; 10.09	25.09; 29.09; 30.10
Earlina 8fc	15.07; 09.07; 31.07	28.07; 18.07; 07.08	17.08; 08.08; 14.08	12.09; 01.09; 23.09
Kompolti	30.08; 08.09; 05.09	12.09; 18.09; 15.09	17.09; 25.09; 23.09	19.10; 15.10; 03.11
Finola	27.06; 25.06; 23.07	11.07; 09.07; 31.07	18.07; 16.07; 07.08	24.08; 17.08; 07.09

4.3. Plon i wilgotność biomasy

Świeży plon biomasy w zależności od odmiany obejmował zakres wartości średnich od 9,39 do 30,19 Mg ha^{-1}, odpowiednio dla Finola i Kompolti (tab. 13). Z kolei rozpiętość wartości średnich dla lat była mniejsza i wyniosła 19,28−22,61 Mg ha^{-1}, przy czym w roku 2025 świeży plon biomasy był niższy w porównaniu do roku 2024. Abstrahując od tego, różnice w plonach biomasy lepiej zobrazowały wartości uzyskane po uwzględnieniu jej W.

Tak też W biomasy podczas zbioru była istotnie zróżnicowana przez odmianę/ rok/sezon wegetacyjny oraz zbiór kwiatów w okresie kwitnienia (tab. 13). Średnia wilgotność zmieściła się w przedziale 59,30−64,74% w zależności od odmiany. Różnica pomiędzy zawierającą w trakcie zbioru najwięcej wody Finola a zawierającą jej najmniej Henola wyniosła 5,4 pp. Z kolei różnice między sezonami wyniosły 7,1 pp. Biomasa, z której w okresie kwitnienia zbierano kwiaty odznaczyła się istotnie wyższą W o 2,3 pp względem biomasy bez zbioru kwiatów. Zbiór kwiatów spowodował, że na wierzchołkach konopi zaobserwowano intensywny rozwój pędów bocznych, a także kwiatów, a zatem wierzchołki tych roślin mogły zawierać w sobie więcej wody.

Otrzymany przedział średnich W dla odmian (tab. 13) był zbliżony do średniej dla dziewięciu odmian zbieranych kiedy pojawiły się pierwsze dojrzałe nasiona, która wynosiła 60,8−70,6%, w zależności od roku (Jankauskiene i Gruzdeviene 2015). Zauważalna większa górna granica może wynikać z wcześniejszego terminu zbioru w badaniach Jankauskiene i Gruzdeviene (2015). Z kolei w uprawie na włókno W biomasy wyniosła 62,1−69,4% (Jasinskas i in. 2020), co również było wartością wyższą w porównaniu do przedziału z niniejszego eksperymentu. Konopie uprawiane na włókno zbiera się wcześniej, zatem nie było to zaskakujące. Prade i in. (2011) podaje, ze takie W biomasy konopi nie są przeszkodą w produkcji biogazu; wymagają zaś zmniejszenia, jeśli planowane będzie przechowywanie (potencjalna degradacja mikrobiologiczna).

Tabela 13. Plon biomasy i jej wilgotność w zależności od odmiany, roku, terminu zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Świeży plon biomasy (Mg ha^{-1})	W (%)	Plon suchej biomasy (Mg ha^{-1} s.m.)
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	27,61 ± 5,55 ab	61,84 ± 3,93 abc	10,60 ± 2,66 ab
	Henola (H)	14,46 ± 3,53 c	59,30 ± 6,15 c	5,76 ± 1,13 cd
	Santhica 27 (S27)	22,81 ± 5,33 b	64,15 ± 4,39 a	8,13 ± 2,02 bc
	Santhica 70 (S70)	27,21 ± 6,95 ab	63,00 ± 3,72 ab	10,05 ± 2,69 ab
	Earlina 8fc (E)	14,95 ± 3,46 c	59,93 ± 6,45 bc	5,96 ± 1,64 d
	Kompolti (K)	30,19 ± 11,75 a	64,41 ± 1,95 a	10,80 ± 4,48 a
	Finola (F)	9,39 ± 3,19 c	64,74 ± 5,51 a	3,40 ± 1,46 d
Rok (Y)	2024 (24)	22,61 ± 11,31 a	58,94 ± 4,21 b	9,07 ± 4,11 a
	2025 (25)	19,28 ± 7,34 b	66,02 ± 2,93 a	6,56 ± 2,49 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem kwiatów (FH)	21,87 ± 10,00	63,63 ± 4,84 a	7,92 ± 3,68
	bez zbiorów kwiatów (NFH)	20,02 ± 9,26	61,33 ± 5,08 b	7,71 ± 3,57
C × Y	B × 24	30,57 ± 3,39 ab	58,66 ± 2,30 ef	12,63 ± 1,45 ab
	B × 25	24,65 ± 5,93 bcd	65,02 ± 2,11 abcd	8,58 ± 1,89 cd
	H × 24	12,36 ± 2,93 ef	54,10 ± 1,63 f	5,66 ± 1,28 de
	H × 25	16,56 ± 2,88 cdef	64,50 ± 3,96 abcd	5,86 ± 1,07 de
	S27 × 24	20,63 ± 6,84 bcde	60,59 ± 2,60 cde	8,20 ± 2,87 cd
	S27 × 25	24,98 ± 2,10 bc	67,70 ± 2,28 a	8,07 ± 0,86 cd
	S70 × 24	28,99 ± 8,68 ab	60,22 ± 2,83 de	11,42 ± 2,99 abc
	S70 × 25	25,43 ± 4,84 bc	65,77 ± 2,01 ab	8,68 ± 1,59 bcd
	E × 24	14,40 ± 3,60 cdef	54,38 ± 2,49 f	6,63 ± 1,99 d
	E × 25	15,50 ± 3,55 def	65,48 ± 3,40 abc	5,29 ± 0,96 de
	K × 24	39,21 ± 9,65 a	63,87 ± 2,35 abcd	14,23 ± 3,83 a
	K × 25	21,16 ± 3,90 bcde	64,95 ± 1,46 abcd	7,38 ± 1,09 d
	F × 24	12,13 ± 1,47 ef	60,74 ± 4,40 bcde	4,73 ± 0,52 de
	F × 25	6,65 ± 1,49 f	68,74 ± 3,01 a	2,07 ± 0,42 e

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Największy średni plon suchej biomasy wykazała Kompolti, 10,80 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 13), czyli odmiana o najdłuższym cyklu rozwojowym (tab. 6). Plon tej odmiany był jednocześnie najmniej stabilny, co wyraziło się SD równym 4,48 Mg ha^{-1} s.m. W tej samej grupie jednorodnej „a" znalazła się Białobrzeskie i Santhica 70 (10,60 i 10,05 Mg ha^{-1} s.m.). Istotnie najniższym plonem odznaczyły się odmiany o najkrótszym cyklu rozwojowym (107−127 dni), tj. Finola, Earlina 8fc oraz Henola. Plon tych trzech odmian był o 45−69% niższy w porównaniu do Kompolti. Podobna zależność zaszła w skrajnie suchych warunkach sezonu wegetacyjnego 2023 (tab. Z4), przy czym wtedy plon Kompolti stanowił niecałe 48% w porównaniu do średniej plonu z lat 2024−2025. Uwzględniając wszystkie trzy lata badań, najwyższy plon w rozbiciu na odmiany uzyskała również Kompolti w roku 2024, tj. 14,23 Mg ha^{-1} s.m. W roku 2023 średni plon, niezależnie od odmiany, wyniósł średnio tylko 3,10 Mg ha^{-1} s.m., co stanowi diametralną różnicę w porównaniu do roku 2024 i 2025 (średni plon równy 9,07 i 6,56 Mg ha^{-1} s.m., odpowiednio). Analizując warunki meteorologiczne w perspektywie całych trzech lat eksperymentu, sezon wegetacyjny 2024 był optymalny, zaś 2023 za suchy, a 2025 zbyt wilgotny (tab. 4 i 5, rys. 1−3). Szczególnie istotne były tutaj warunki przed oraz po wysiewie nasion, które ukształtowały wschody roślin. Co mogło wydawać się przed przeprowadzeniem eksperymentu paradoksalne, zbiór kwiatów w okresie kwitnienia nie wpłynął istotnie na plon biomasy. Zawsze po zbiorze kwiatów obserwowany był na wierzchołkach roślin silny rozwój pędów bocznych z odtwarzaniem kwiatów, które później wydawały także nasiona (fot. 5).

Białobrzeskie i Santhica 27 uprawiano też przez trzy lata na Litwie, otrzymując średnioroczny plon 11,34−11,61 i 10,31−11,94 Mg ha^{-1} s.m., odpowiednio (Jankauskiene i Gruzdeviene 2015). W niniejszym doświadczeniu były odmienne wahania plonu powodujące wyższe bądź niższe plony w zależności od odmiany i roku (8,58−12,63 i 8,07−8,20 dla Białobrzeskie i Santhica 27, odpowiednio, tab. 13), co wynika najprawdopodobniej ze słabszego stanowiska glebowego (gleba marginalna). We wschodniej Kanadzie uprawiano 11 odmian konopi przemysłowych, z czego jedną była Finola z plonem w zależności od roku i stanowiska wynoszącym 0,46−2,89 Mg ha^{-1} s.m. Na zbliżonym piaszczystym stanowisku glebowym z tę samą dawką nawożenie azotowego uzyskano plon biomasy równy 0,61 Mg ha^{-1} s.m. (Aubin i in. 2016). To znacznie mniej w porównaniu do Finola z naszego eksperymentu 2,07−4,73 Mg ha^{-1} s.m. (lata 2024−2025, tab. 13). Podobny plon (0,69 Mg ha^{-1} s.m., tab. Z4) uzyskano jedynie w roku 2023, kiedy wschody były drastycznie zaniżone przez suszę glebową spowodowaną brakiem opadów. Podobny plon biomasy dla odmiany Finola, mieszczący się w ww. przedziale, uzyskał Jasinskas i in. (2020), tj. 3,25−3,41 Mg ha^{-1} s.m. (uprawa

na włókno). Konopie wykazują zdolność do wzrostu w warunkach ograniczonej lub zmiennej dostępności wody, charakteryzując się stosunkowo niskimi wymaganiami wodnymi, wynoszącymi od 220 do 450 mm, w porównaniu z innymi roślinami włóknistymi (Gill i in. 2023). W naszym eksperymencie suma opadów atmosferycznych w każdym sezonie (2023−2025) spełniła te wymóg (tab. 5), jednakże to nie suma opadów w sezonie, lecz ich rozkład w czasie był decydujący, co dobrze oddał rok 2023 (rys. 1).



Fotografia 5. Rozwój pędów bocznych i kwiatostanów po zbiorze kwiatów, prowadzący do wytworzenia nasion. Miejsca po cięciu kwiatów/wiech zaznaczono czerwonymi okręgami.

4.4. Plon całkowity

Wcześniejsze „wyniesienie" kwiatów w trakcie kwitnienia z pola, spowodowało, że średni całkowity plon biomasy również był największy dla Kompolti, 11,04 Mg ha^{-1} s.m. (tab. 14). Analogicznie, w tej samej grupie jednorodnej „a" znalazła się też Białobrzeskie i Santhica 70 (10,96 i 10,25 Mg ha^{-1} s.m., odpowiednio). Tak samo jak przy plonie biomasy, Finola, Henola i Earlina 8fc utworzyły zgrupowanie cechujące się najniższymi całkowitymi plonami biomasy (44−68% mniej względem Kompolti). Zbiór kwiatów również i w tym przypadku nie zróżnicował istotnie całkowitego plonu biomasy, chociaż analizując indywidualnie interakcję odmiana × zbiór kwiatów w większości przypadków odmiany ze zbiorem kwiatów odznaczyły się wyższym plonem.

Tabela 14. Plon całkowity w zależności od odmiany, roku, zbioru kwiatów oraz interakcji odmiana × rok i odmiana × zbiór kwiatów.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Całkowity plon biomasy (Mg ha^{-1} s.m.)	Całkowity plon olejku eterycznego (L ha^{-1})	Plon nasion (Mg ha^{-1})
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	10,96 ± 2,67 a	1,59 ± 1,03 a	0,29 ± 0,14 b
	Henola (H)	6,04 ± 1,33 cd	1,57 ± 0,74 a	0,89 ± 0,59 a
	Santhica 27 (S27)	8,37 ± 2,00 bc	0,59 ± 0,41 c	0,08 ± 0,04 c
	Santhica 70 (S70)	10,25 ± 2,72 ab	0,66 ± 0,62 c	0,08 ± 0,05 c
	Earlina 8fc (E)	6,19 ± 1,66 c	1,20 ± 0,56 ab	0,40 ± 0,20 b
	Kompolti (K)	11,04 ± 4,60 a	1,45 ± 1,22 a	0,31 ± 0,26 b
	Finola (F)	3,57 ± 1,56 d	1,00 ± 0,86 bc	0,76 ± 0,59 a
Rok (Y)	2024 (24)	9,34 ± 4,12 a	1,47 ± 0,97 a	0,52 ± 0,58 a
	2025 (25)	6,78 ± 2,62 b	0,84 ± 0,65 b	0,28 ± 0,17 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem kwiatów (FH)	8,41 ± 3,76	1,67 ± 0,89 a	0,37 ± 0,33 b
	bez zbiorów kwiatów (NFH)	7,71 ± 3,57	0,63 ± 0,46 b	0,43 ± 0,53 a
C × Y	B × 24	12,98 ± 1,23 ab	2,00 ± 0,87 ab	0,38 ± 0,12 bcd
	B × 25	8,94 ± 2,10 bcd	1,19 ± 1,09 cde	0,20 ± 0,08 cde
	H × 24	6,03 ± 1,56 de	1,92 ± 0,85 ab	1,34 ± 0,52 a
	H × 25	6,04 ± 1,22 de	1,23 ± 0,45 cde	0,43 ± 0,06 bc
	S27 × 24	8,36 ± 2,85 cd	0,63 ± 0,38 ef	0,05 ± 0,02 e
	S27 × 25	8,39 ± 0,81 cd	0,55 ± 0,47 ef	0,12 ± 0,02 de
	S70 × 24	11,51 ± 3,04 abc	0,50 ± 0,26 f	0,04 ± 0,01 e
	S70 × 25	8,99 ± 1,81 bcd	0,83 ± 0,84 def	0,12 ± 0,03 de
	E × 24	6,88 ± 1,92 d	1,43 ± 0,55 bcd	0,48 ± 0,25 bc
	E × 25	5,50 ± 1,10 de	0,97 ± 0,51 cdef	0,32 ± 0,10 bcde
	K × 24	14,59 ± 3,88 a	2,17 ± 1,38 a	0,07 ± 0,02 e
	K × 25	7,50 ± 1,19 cd	0,73 ± 0,32 ef	0,56 ± 0,07 b
	F × 24	5,01 ± 0,43 de	1,63 ± 0,79 abc	1,27 ± 0,33 a
	F × 25	2,13 ± 0,45 e	0,37 ± 0,20 f	0,24 ± 0,07 cde
C × F	B × FH	11,22 ± 2,21 a	2,39 ± 0,74 a	0,33 ± 0,15 efg
	B × NFH	10,70 ± 3,27 ab	0,80 ± 0,53 efg	0,25 ± 0,12 efg

	H × FH	6,83 ± 1,38 bcd	2,08 ± 0,67 abc	0,68 ± 0,28 bcd
	H × NFH	5,24 ± 0,70 cd	1,06 ± 0,38 def	1,09 ± 0,77 a
	S27 × FH	8,13 ± 2,33 abc	0,95 ± 0,17 def	0,09 ± 0,04 fg
	S27 × NFH	8,61 ± 1,79 abc	0,22 ± 0,14 g	0,07 ± 0,04 g
	S70 × FH	11,42 ± 3,08 a	1,14 ± 0,55 def	0,09 ± 0,05 fg
	S70 × NFH	9,08 ± 1,89 abc	0,19 ± 0,08 g	0,07 ± 0,04 g
	E × FH	6,18 ± 1,64 cd	1,57 ± 0,34 bcd	0,39 ± 0,16 def
	E × NFH	6,19 ± 1,83 cd	0,84 ± 0,50 efg	0,41 ± 0,26 cde
	K × FH	11,54 ± 4,45 a	2,18 ± 1,36 ab	0,31 ± 0,28 efg
	K × NFH	10,55 ± 5,12 ab	0,71 ± 0,30 fg	0,31 ± 0,26 efg
	F × FH	3,57 ± 1,60 d	1,41 ± 1,02 cde	0,69 ± 0,49 bc
	F × NFH	3,58 ± 1,67 d	0,58 ± 0,41 fg	0,83 ± 0,71 ab

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Uwzględnienie zbioru kwiatów nieznacznie poprawiło całkowity plon biomasy względem plonu biomasy, od ok. 2% (Santhica 70 i Kompolti) do 5% (Henola i Finola) (tab. 13 i 14). Całkowite plony biomasy były i tak znacznie niższe w porównaniu do uprawy, również w Polsce, tych samych odmian, gdzie plon biomasy Earlina 8fc, Henola, Białobrzeskie, Kompolti i Finola wyniósł kolejno 16,76; 14,85; 25,14; 30,09; i 8,57 Mg ha^{-1} (Wawro i in. 2025). Różnicę spowodowały zapewne obecne w niniejszym eksperymencie: marginalna gleba oraz niższa gęstość siewu (15−29 vs. 40 kg ha^{-1}). Przykładowo Białobrzeskie wysiano przy 15 kg ha^{-1} i uzyskano całkowity plon biomasy 10,96 Mg ha^{-1} s.m., czyli porównywalny do uprawy Białobrzeskie w innej części Polski przy tej samej gęstości siewu (12,39 Mg ha^{-1} przy W = 18%, czyli 10,16 Mg ha^{-1} s.m.; zbiór w terminie końca zawiązywania nasion) (Kołodziej i in. 2023).

Całkowity plon olejku eterycznego stanowiący sumę uzysku olejku z kwiatów oraz biokoncentratu, niezależnie od roku i zbioru kwiatów, był istotnie najwyższy dla Białobrzeskie, Henola, Kompolti i Earlina 8 fc (1,20−1,59 L ha^{-1}) (tab. 14). W roku 2024 uzyskano istotnie większy całkowity plon niż w 2025 (1,47 vs. 0,84 L ha^{-1}). Zbiór kwiatów w okresie kwitnienia umożliwił uzyskanie istotnie większego o 165% plon olejku, a jednocześnie nie wpłynął na plon biomasy oraz całkowity plon biomasy. Interakcja odmiana × zbiór kwiatów ujawniła, że istotnie największy średni całkowity plon olejku zapewniły odmiany ze zbiorem kwiatów w okresie kwitnienia: Białobrzeskie, Henola i Kompolti 2,08−2,39 L ha^{-1}).

Wyniki te pokazują, że dzięki pozostałościom po omłocie, jako produktowi ubocznemu, można zwiększyć plon olejku eterycznego na glebach marginalnych. Do podobnego wniosku doszedł Sugier i in. (2025) dzięki waloryzacji i określeniu plonów owocostanów konopi. Wzmacnia to ideę wielofunkcyjności konopi poprzez pełne wykorzystanie puli dostępnych kwiatostanów, w tym biokoncentratu, do produkcji olejków eterycznych (Bertoli i in. 2010). Niemniej jednak w porównaniu do znacznie lepszych warunków uprawy uzyskane całkowite plony olejku eterycznego mogą być i tak niskie w porównaniu do innych badań. Średni całkowity plon nie przekroczył nigdy 2,39 L ha^{-1} (sekcja C × F w tab. 14), co pokazało, że w optymalniejszych uwarunkowaniach, m.in. glebowych czy w aspekcie warunków meteorologicznych, można uzyskać porównywalny bądź wyższy plon z samych kwiatów, np. 2,4 L ha^{-1} (Vuerich i in. 2019) czy 3,96−4,80 L ha^{-1} (Baldini i in. 2018). Należy przy tym podkreślić, że skład olejku z dwóch różnych surowców może być istotnie odmienny, i należy zająć się tym w przyszłych badaniach.

Średni plon nasion w roku 2024 wyniósł 0,52 Mg ha^{-1}, zaś w roku 2025 był istotnie niższy o 46% (tab. 14). Na przekór suchym warunkom w 2023 (rys. 1, tab. 4) oraz obniżonym wschodom plon nasion w tym sezonie wyniósł 21% mniej względem 2024 (tab. Z5). Wynika to najprawdopodobniej stąd, że konopie przemysłowe potrafią ograniczyć całkowity plon biomasy (w roku 2023 średnio o 53−66% mniej względem lat 2024−2025), dzięki czemu zapewniona zostaje reprodukcja. Istotnie najwyższe średnie plony nasion otrzymano z dwóch odmian kwietno-nasiennych, tj. Henola (0,89 Mg ha^{-1}) i Finola (0,76 Mg ha^{-1}) (grupa „a"). Zbiór kwiatów, pomimo braku wpływu na plon biomasy i całkowity plon biomasy oraz zwiększenie całkowitego plonu olejku eterycznego, istotnie obniżył plon nasion o ok. 14%. W rozbiciu na wszystkie przypadki interakcji odmiana × rok największy plon uzyskano z Henola oraz Finola w roku 2024 (1,34 i 1,27 Mg ha^{-1}, grupa „a"). W całym trzyletnim okresie doświadczenia obserwowano żerowanie awifauny (tab. 15, fot. 6 i 7) na konopiach, które rozpoczynało się pod koniec sierpnia, czyli wraz z końcem okresu lęgowego pospolitych ptaków lęgowych w Polsce. Był to jednocześnie moment, kiedy większość upraw innych gatunków w otulinie uprawy konopi została już zebrana/uprzątnięta. Gradacja ptaków trwała do samego końca zbiorów roślin, a ptaki siadały na konopiach, kiedy podsadki/okwiaty zaczynały dopiero się wypełniać (nasiona się formowały i podsadki były wewnątrz „mleczne"). Abstrahując od tego, doświadczenie zlokalizowane było w odległości ok. 100 m od zabudowy zagrodowej stanowiącej siedlisko lęgowe dla gatunków ptaków zalatujących na pole doświadczalne. Warto jednak podkreślić, że w niniejszym eksperymencie poletka doświadczalne obejmowały łącznie powierzchnię 604,8 m^2. Żerowanie w ciągu sezonu kilku stad ptaków liczących po kilkadziesiąt osobników nie spowodowałoby takich strat w uprawie komercyjnej konopi przemysłowych (o znacznie większej powierzchni) jak w przypadku uprawy doświadczalnej.

Tabela 15. Odnotowane gatunki ptaków w uprawie konopi włóknistych.

Gatunek awifauny	Zachowanie
skowronek *Alauda arvensis*	żerowanie w międzyrzędziach
dzwoniec *Chloris chloris*	żerowanie na konopiach
grzywacz *Columba palumbus*	zalatujący (bardzo rzadko)
cierniówka *Curruca communis*	zalatujący (bardzo rzadko)
zięba *Fringilla coelebs*	żerowanie na konopiach
jer *Fringilla montifringilla*	żerowanie na konopiach
pliszka siwa *Motacilla alba*	żerowanie w międzyrzędziach
bogatka *Parus major*	żerowanie na konopiach
wróbel *Passer domesticus*	żerowanie na konopiach
kląskawka *Saxicola rubicola*	zalatujący (w tym śpiewający)



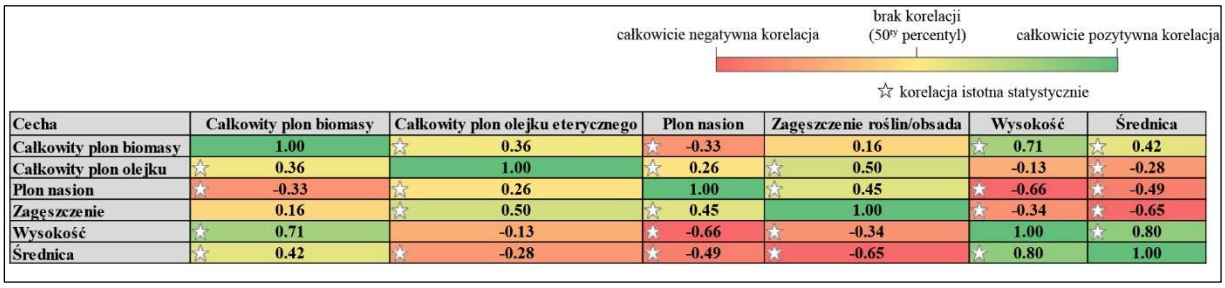
Fotografia 6. Dzwońce *Chloris chloris* żerujące na konopiach włóknistych (2025 rok).



Fotografia 7. Jery *Fringilla montifringilla* żerujące na konopiach włóknistych (2023 rok).

Niemniej jednak niniejsze badanie potwierdziło, że produkcja nasion była większa u genotypów wcześnie kwitnących (Henola, Earlina 8fc i Finola) w porównaniu do genotypów kwitnących później (Białobrzeskie, Santhica 27, Santhica 70 i Kompolti). Taką samą zależność odnotował Campiglia i in. (2017). Najniższy średni plon nasion odnotowano dla Santhica 27 i 70 (ok. 0,08 Mg ha^{-1}, oba przypadki), jednakże w innych doświadczeniach zdarzały się jeszcze niższe plony nasion, w tym dla Santhica 27 (0,01−0,02 Mg ha^{-1}) (Campiglia i in. 2017). Dla polskich odmian Białobrzeskie i Henola podaje się typowy plon nasion 0,8−1,0 i 1,5−2,1 Mg ha^{-1}, odpowiednio (Teleszko i in. 2022). W niniejszym eksperymencie uzyskano średnie 0,29 i 0,89 Mg ha^{-1} (tab. 14), odpowiednio. Niższe plony wynikają na pewno z odnotowanego żerowania ptaków; drugi aspekt to gleba marginalna. Jeśli chodzi o istotny wpływ roku na plon nasion, to został on stwierdzony również w badaniach Tsaliki i in. (2021).

Najsilniejsze istotne korelacje w zakresie całkowitego plonu i biometrii (> bezwzględnych 0,6) zaszły pomiędzy wysokością i średnicą (0,80), całkowitym plonem biomasy i wysokością (0,71), plonem nasion i wysokością (−0,66) oraz zagęszczeniem roślin i średnicą (−0,65) (rys. 4). Uogólniając, wzrostowi wysokości towarzyszył wzrost średnicy (wyższe odmiany miały jednocześnie grubsze pędy); poletka z wyższymi roślinami odznaczały się istotnie wyższym finalnym całkowitym plonem biomasy; otrzymanie wyższego plonu nasion zapewniała uprawa niższych odmian; a wzrost zagęszczenia roślin powodował spadek średnic pędów.



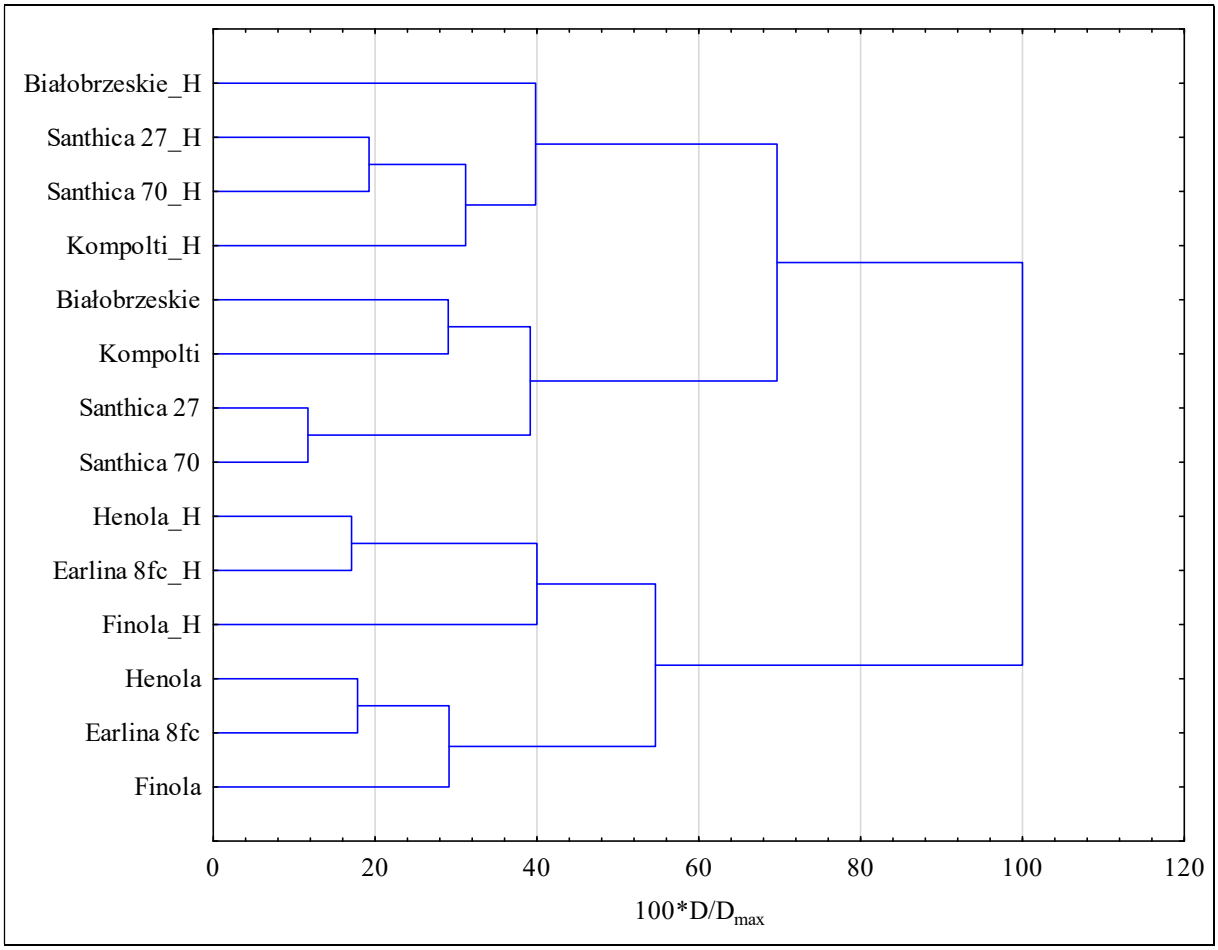
Cecha	Całkowity plon biomasy	Całkowity plon olejku eterycznego	Plon nasion	Zagęszczenie roślin/obsada	Wysokość	Średnica
Całkowity plon biomasy	1.00	☆ 0.36	★ -0.33	0.16	★ 0.71	☆ 0.42
Całkowity plon olejku	☆ 0.36	1.00	☆ 0.26	☆ 0.50	-0.13	★ -0.28
Plon nasion	★ -0.33	☆ 0.26	1.00	☆ 0.45	★ -0.66	★ -0.49
Zagęszczenie	0.16	☆ 0.50	☆ 0.45	1.00	★ -0.34	★ -0.65
Wysokość	☆ 0.71	-0.13	★ -0.66	☆ -0.34	1.00	☆ 0.80
Średnica	☆ 0.42	☆ -0.28	★ -0.49	★ -0.65	★ 0.80	1.00

Rysunek 4. Mapa cieplna współczynników korelacji Pearsona dla plonu całkowitego konopi oraz cech biometrycznych

4.4.1. Profile odmian

Interakcja odmiana × zbiór kwiatów wykazała wyraźny podział przypadków na dwa główne skupienia (rys. 5). Wskazało to na istnienie dwóch odmiennych profili wielowymiarowych w analizowanym zbiorze wszystkich uzyskanych wyników, przy czym rozdzielenie dwóch głównych gałęzi następowało przy relatywnie dużej odległości wiązania

(ok. 60 i 70 D/D_{max}). Różnice pomiędzy tymi dwiema grupami były znaczące w porównaniu do zmienności wewnątrzgrupowej.



Rysunek 5. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa między przypadkami interakcji odmiana × zbiór kwiatów (przyrostek „H" oznacza obiekty ze zbiorem kwiatów; jego brak – obiekty bez zbioru kwiatów). D – odległość wiązania; D_{max} – maksymalna odległość wiązania.

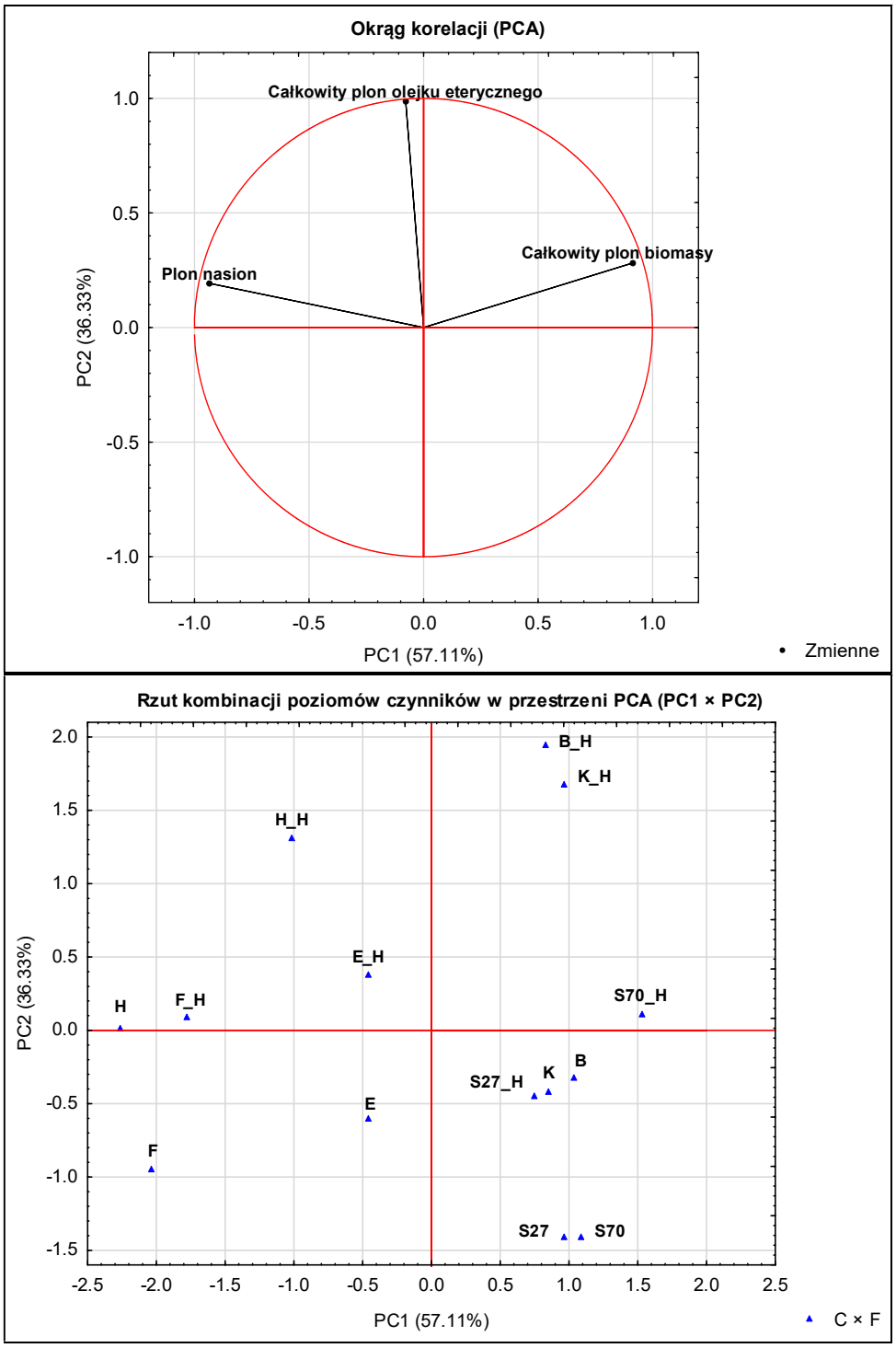
Pierwsze skupienie objęło kombinacje związane z odmianami Białobrzeskie, Santhica 27, Santhica 70 oraz Kompolti (odmiany włókniste/biomasowe o dłuższym cyklu rozwojowym), przy czym w obrębie tej grupy występowały zarówno warianty ze zbiorem kwiatów w okresie kwitnienia (oznaczone „_H"), jak i bez zbioru kwiatów. Drugie skupienie grupowało odmiany Henola, Earlina 8fc oraz Finola (odmiany określane jako kwietno-nasienne o krótszym cyklu rozwojowym) — również z uwzględnieniem obu wariantów („_H" i bez). W obu wariantach

(ze zbiorem kwiatów oraz bez) najbardziej podobne do siebie były Santhica 27 i Santhica 70 oraz Henola i Earlina 8fc.

Reasumując, tożsamość odmiany (czynnik genotypowy) była czynnikiem dominującym i kształtującym ogólny wzorzec podobieństw, natomiast zbiór kwiatów modyfikował profil poszczególnych odmian, ale generalnie nie niwelował różnic wynikających z genotypu.

W kontekście praktyki rolniczej intryguje wybór odmiany uniwersalnej, która przy analizowanych uwarunkowaniach zagwarantuje kompromis całkowity plon biomasy − całkowity plon olejku eterycznego − plon nasion. Dla innych rolników będzie to z kolei maksymalizacja uzysku olejku połączona z maksymalizacją uzysku biomasy, a dla jeszcze innych, np. maksymalizacja uzysku nasion przy jak najmniejszym plonie biomasy.

Po analizie PCA trzech kluczowych parametrów dotyczących plonu kompromis biomasa − olejek eteryczny − nasiona zapewniła w pierwszej kolejności Henola ze zbiorem kwiatów, a w drugiej kolejności Earlina ze zbiorem kwiatów (rys. 6). Były to odmiany cechujące się niższa wysokością, często określane jako kwietno-nasienne, o krótkim cyklu rozwojowym. Pierwsza była odmianą polską, a druga francuską. Specjalizację w pozyskiwaniu olejku i biomasy zapewniła Białobrzeskie ze zbiorem kwiatów oraz Kompolti ze zbiorem kwiatów (odmiany wysokie, określane jako włókniste/biomasowe, o długim cyklu rozwojowym). Natomiast maksymalizację plonu nasion przy zredukowaniu biomasy (i zapewnieniu nie najniższego plonu olejku) Henola bez zbioru kwiatów oraz Finola ze zbiorem kwiatów.



Rysunek 6. Analiza PCA podsumowująca zależności między cechami plonu oraz różnice między kombinacjami odmiana × zbiór kwiatów. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji. W dolnym zaprezentowano wykres wyników dla odmiana × zbiór kwiatów (B – Białobrzeskie, H – Henola, S27 – Santhica 27, S70 – Santhica 70, E – Earlina 8fc, K – Kompolti, F – Finola; przyrostek „_H" oznacza obiekty ze zbiorem kwiatów, a jego brak – obiekty bez zbioru kwiatów).

Wybierając odmianę pod konkretny kierunek uprawy należy również pamiętać o wpływie roku oraz interakcji odmiana × rok, które mogą zarówno zmniejszać jak i zwiększać poszczególne parametry. Indywidualny udział roku w zmienności całkowitego plonu oraz biometrii wyniósł maksymalnie 13% i miało to miejsce w przypadku całkowitego plonu olejku eterycznego (rys. 7). Wpływ interakcji odmiana × rok miał zbliżone rzędy wielkości poza jednym wyjątkiem, który stanowił plon nasion, gdzie ten wpływ interakcji wyniósł 34%. Oznacza to, że rodzaj oddziaływania roku na plon nasion może być zależny od odmiany.



Rysunek 7. Mapa cieplna przedstawiająca procentowy udział głównych czynników (odmiany, zbioru kwiatów i roku) oraz ich interakcji w całkowitej wariancji plonu konopi i cech biometrycznych. Intensywność barwy wzrasta wraz z wielkością efektu. „Reszta" oznacza wariancję niewyjaśnioną.

4.5. Predykcja kannabidiolu i tetrahydrokannabinolu

Faza fenologicznie istotnie zróżnicowała predykcyjną zawartość kannabidiolu (CBD). Istotnie najniższa średnia zawartość była w okresie kwitnienia (2,16% s.m.) (tab. 16), kiedy w obrębie podsadek widoczne były białe znamiona słupków (fot. 8). Następnie w okresie późnego kwitnienia następował istotny wzrost o ok. 58% do 3,42% s.m. W fazie dojrzewania nasion zawartość CBD wyniosła średnio 2,90% s.m. Oznaczało to istotny spadek o ok. 15% względem późnego kwitnienia, ale nadal była to istotnie wyższa zawartość o ok. 34% względem fazy kwitnienia.

Tabela 16. Predykcyjny profil kannabinoidowy kwiatostanów konopi w zależności od odmiany i fazy fenologicznej.

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Całkowite CBD (% s.m.)	Całkowite THC (% s.m.)
Odmiana × faza fenologiczna	Białobrzeskie × kwitnienie	2,08 ± 0,47 ijk	0,12 ± 0,04 hij
	Białobrzeskie × późne kwitnienie	4,64 ± 1,48 a	0,16 ± 0,06 cde
	Białobrzeskie × dojrzewanie nasion	2,49 ± 0,34 fghi	0,18 ± 0,03 bc
	Henola × kwitnienie	1,76 ± 0,35 k	0,14 ± 0,06 defgh
	Henola × późne kwitnienie	2,81 ± 1,00 defg	0,13 ± 0,04 fghi
	Henola × dojrzewanie nasion	2,40 ± 0,86 ghij	0,15 ± 0,05 cdefg
	Santhica 27 × kwitnienie	2,21 ± 0,48 ijk	0,08 ± 0,04 k
	Santhica 27 × późne kwitnienie	3,19 ± 1,10 cd	0,12 ± 0,06 ghij
	Santhica 27 × dojrzewanie nasion	2,71 ± 0,88 efgh	0,10 ± 0,05 ijk
	Santhica 70 × kwitnienie	2,11 ± 0,40 ijk	0,10 ± 0,02 jk
	Santhica 70 × późne kwitnienie	3,05 ± 0,79 cde	0,13 ± 0,05 fghi
	Santhica 70 × dojrzewanie nasion	2,31 ± 0,37 hij	0,15 ± 0,05 cdefg
	Earlina 8fc × kwitnienie	2,28 ± 0,70 hij	0,11 ± 0,04 hijk
	Earlina 8fc × późne kwitnienie	2,88 ± 1,12 def	0,13 ± 0,05 efghi
	Earlina 8fc × dojrzewanie nasion	3,98 ± 1,17 b	0,21 ± 0,09 b
	Kompolti × kwitnienie	2,68 ± 0,89 efgh	0,13 ± 0,04 fghi
	Kompolti × późne kwitnienie	4,15 ± 1,72 b	0,25 ± 0,13 a
	Kompolti × dojrzewanie nasion	2,93 ± 0,98 def	0,16 ± 0,07 cdef
	Finola × kwitnienie	1,99 ± 0,35 jk	0,12 ± 0,04 ghi
	Finola × późne kwitnienie	3,26 ± 1,20 cd	0,17 ± 0,07 cd
	Finola × dojrzewanie nasion	3,46 ± 1,13 c	0,16 ± 0,07 cd
Faza fenologiczna	kwitnienie	2,16 ± 0,61 c	0,11 ± 0,05 b
	późne kwitnienie	3,42 ± 1,39 a	0,16 ± 0,08 a
	dojrzewanie nasion	2,90 ± 1,04 b	0,16 ± 0,07 a



Fotografia 8. Podsadki i znamiona słupków w kolejnych fazach fenologicznych (od lewej do prawej: kwitnienie, późne kwitnienie, dojrzewanie nasion).

Predykcja CBD ujawniła przekrój średnich zawartości w danej fazie zależny od odmiany: 1,76−2,68% s.m. dla kwitnienia; 2,81−4,64% s.m. dla późnego kwitnienia; oraz 2,31−3,98% s.m. dla dojrzewania nasion (tab. 16). Należy zdawać sobie sprawę, że jeśli przyjmie się fazę kwitnienia jako punkt odniesienia w czasie, to próbki dla późnego kwitnienia nie były pobierane w tym samym odstępie czasowym (liczbie dni od fazy kwitnienia) dla każdej odmiany czy dla tych samych odmian w różnych latach (tab. 12). Pobieranie próbek dla późnego kwitnienia miało miejsce w terminie 5−36 dni od fazy kwitnienia w zależności od odmiany i roku. Zatem odmiany, z których próbki dla późnego kwitnienia pobrano później mogły cechować się m.in. wyższą predykcyjną zawartością CBD, mimo że w każdym przypadku była to ta sama faza, czyli późne kwitnienia. Od późnego kwitnienia do dojrzewania nasion występuje szeroki przedział czasowy w porównaniu do przejścia z kwitnienia do późnego kwitnienia. W trakcie późnego kwitnienia wzrastało m.in. zagęszczenia białawego owoszczenia/owłosienia tworzonego przez trichomy, a także wzrastała objętość podsadek, co mogło rzutować na wyniki predykcyjnej zawartości CBD. Potwierdzenie na to znajduje się w badaniach Yang i in. (2020), gdzie całkowite stężenie CBD czy tetrahydrokannabinolu (THC) znacząco wzrosło wraz z dojrzewaniem kwiatów, osiągając najwyższe stężenie w ciągu kilku tygodni po kwitnieniu. Zróżnicowanie odmian dodatkowo podkreśla fakt, że na liczbę, rozwój i stopień dojrzewania włosków/trichomów główkowatych wpływa genotyp i wiek rośliny (Punja i in. 2023). Natomiast ogólny spadek CBD w fazie dojrzewania nasion jest typowy, gdyż po okresie plateau o różnej długości dla różnych odmian, szczytowe stężenia kannabinoidów spadają wraz ze starzeniem się roślin (Yang i in. 2020).

Indywidualne fazy kwitnienia czy fazy dojrzewania nasion były bardziej charakterystyczne morfologicznie i nierozciągnięte w czasie. Najwyższą średnią predykcyjną zawartością CBD w okresie kwitnienia odznaczyła się Kompolti (2,68% s.m.), w fazie późnego kwitnienia Białobrzeskie (4,64% s.m.), zaś w okresie dojrzewania nasion Earlina 8fc (3,98% s.m.). Jeśli chodzi o THC, to jego średnia zawartość była najniższa w okresie kwitnienia (0,11% s.m., grupa „a"). Natomiast istotnie najwyższa w okresie późnego kwitnienia i dojrzewania nasion (obie zawartości 0,16% s.m., „b"). Średnia zawartość THC nigdy nie przekroczyła progu 0,3%, w związku z czym definicja konopi przemysłowych/włóknistych, która jest ściśle uregulowana prawnie m.in. w ustawie Farm Bill (Bajwa i in. 2024), została spełniona.

Dreger i in. (2023) oznaczyli zawartość CBD i kwasu kannabidiolowego (CBDA) w kwiatostanach 17 różnych odmian, które pobrano na początku dojrzewania nasion, otrzymując sumarycznie 0,53−5,07% s.m. Ta faza fenologiczna zawiera się w fazie późnego kwitnienia zdefiniowanego w niniejszym badaniu, gdzie zakres zawartości wyniósł

2,81−4,64% s.m. w zależności od odmiany (tab. 16), a co za tym idzie zmieścił się przywołanym/zacytowanym przedziale. W innym badaniu na etapie dojrzewania nasion (BBCH 87) zawartość CBD wyniosła 2,41% s.m. dla odmiany Codimono i 2,75% s.m. dla Fibrante (Pieracci 2023). W niniejszym badaniu zbliżony predykcyjny wynik uzyskano w fazie dojrzewania nasion (BBCH 81) dla Santhica 70 (2,31% s.m.), Henola (2,40% s.m.), Białobrzeskie (2,49% s.m.) czy Santhica 27 (2,71% s.m.) (tab. 16). W olejku eterycznym z kwiatostanów odmiany Felina 32 stężenie CBD wyniosło 4,9% (kwiatostany zebrano pod koniec lipca; nie zdefiniowano fazy fenologicznej) (Fiorini i in. 2019) i była to zawartość zbliżona do predykcyjnej zawartości dla fazy kwitnienia (2,81−4,64% s.m., tab. 16) z niniejszego badania. Należy jednak zdawać sobie sprawę, że hydrodestylacja nie jest skuteczną metodą przenoszenia CBD (mało lotne i tendencja do pozostawania w materiale roślinnym) (Zheljazkov i Maggi 2021), w związku z czym ta zawartość mogła być zaniżona względem zawartości w kwiatostanach, z których pozyskano olejek. Również agrotechnika może powodować różnice, np. nawożenie zwiększało zawartość CBD w kwiatostanach (Wei
i in. 2023).

4.6. Zróżnicowanie składu i właściwości łodyg

Analiza wariancji wykazała, że odmiana była czynnikiem istotnie różnicującym niemal wszystkie badane cechy łodyg ($p < 0,05$), z wyjątkiem zawartości węgla (C), wodoru (H) i siarki (S), co wskazuje na silne uwarunkowanie genotypowe większości parametrów (tab. 17). Rok, czyli sezon wegetacyjny, miał istotny wpływ na wszystkie cechy, co potwierdza znaczenie warunków meteorologicznych, a tym samym „zagnieżdżonej" w roku zmienności środowiskowej dla składu łodyg. Z kolei zbiór kwiatów wpłynął istotnie jedynie na wilgotność (W) i zawartość popiołu (A). Oznacza to, że w badanym zakresie zbiór kwiatów miał znaczenie drugorzędne w porównaniu z odmianą i rokiem/sezonem wegetacyjnym uprawy.

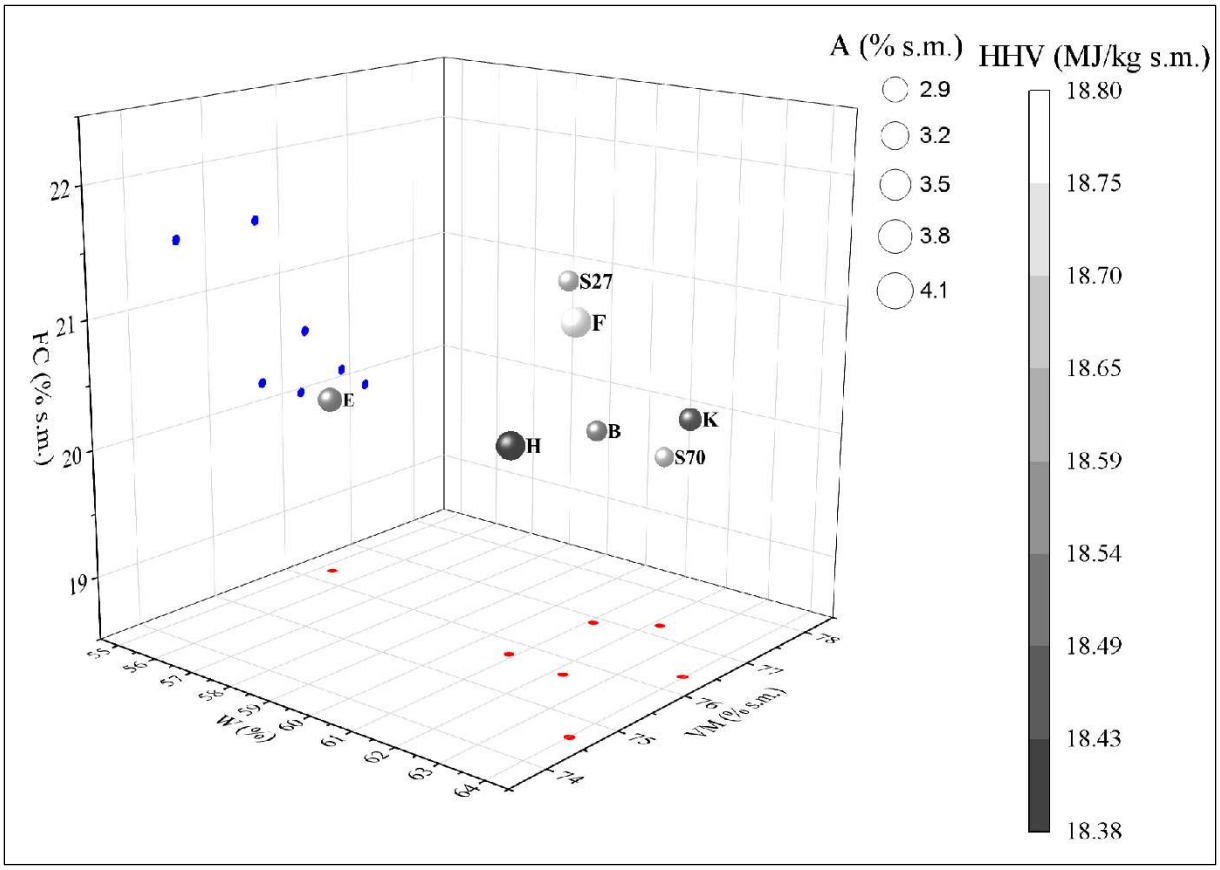
Tabela 17. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych źródeł zmienności i cech.

Atrybut	Odmiana	Zbiór kwiatów	Rok
W	<0,001*	<0,001*	<0,001*
VM	<0,001*	0,514	<0,001*
FC	<0,001*	0,497	<0,001*
A	<0,001*	0,003*	<0,001*
HHV	<0,001*	0,115	<0,001*
LHV	<0,001*	0,203	<0,001*
C	0,525	0,166	0,003*
H	0,201	0,081	<0,001*
S	0,216	0,193	<0,001*
N	<0,001*	0,316	<0,001*
Cl	0,001*	0,067	<0,001*
Cel	<0,001*	0,22	<0,001*
Hem	<0,001*	0,446	<0,001*
Lig	<0,001*	0,88	0,001*
CWE	<0,001*	0,166	<0,001*
HWE	<0,001*	0,29	<0,001*
OSS	<0,001*	0,77	<0,001*

*wartości istotne statystycznie ($p < 0,05$).

4.6.1. Skład przybliżony

Odnotowano różnice między odmianami w ich profilach proksymatycznych, wskazując na brak jednego dominującego „wzorca" tych właściwości (rys. 8). Jednocześnie uwidoczniono dla każdej z odmian odmienne kompromisy między parametrami w układzie zawartość części lotnych (VM) – zawartość węgla stałego (FC) – zawartość popiołu (A), które należy uwzględniać przy wyborze łodyg konopi do potencjalnego wykorzystania procesowego. Intrygujący był profil odmiany Finola, która oprócz istotnie najniższej VM posiadała również istotnie najwyższą FC i A.



Rysunek 8. Trójwymiarowy wykres rozrzutu parametrów analizy przybliżonej (W, VM, FC i A) oraz ciepła spalania (HHV) łodyg konopi. Wielkość punktów reprezentuje A (% s.m.), natomiast kolor punktów (skala szarości) wskazuje HHV,(MJ kg^{-1} s.m.). Etykiety oznaczają odmiany (B – Białobrzeskie, H – Henola, S27 – Santhica 27, S70 – Santhica 70, E – Earlina 8fc, K – Kompolti oraz F – Finola).

Odmiana istotnie zróżnicowała wilgotność (W). Najwyższe wartości stwierdzono dla Finola (64,01%; grupa „a") oraz Kompolti (63,97%; „a") (tab. 18). Natomiast Earlina 8fc charakteryzowała się istotnie najniższą W, o ok. 8,7 pp względem grupy „a". Białobrzeskie, Henola, Santhica 27 i Santhica 70, które utworzyły grupy pośrednie („ab"–„b"). Odmiany dwupienne cechowały się zatem najwyższymi W, zaś W odmian jednopiennych były niższe. W ujęciu sezonu wegetacyjnego najwyższą W odnotowano w 2025 (65,82%; „a"), a najniższą w 2024 (56,33%; „c"). Łodygi, z których w sezonie wegetacyjnym nie zbierano kwiatów, cechowały się istotnie niższą W (60,43 vs. 62,34%).

Tabela 18. Skład proksymalny łodyg konopi w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku.

Źródło zmienności	Obiekt	W (%)	VM (% s.m.)	FC (% s.m.)	A (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	61,11 ± 4,07 b	76,88 ± 1,91 ab	20,05 ±1,25 b	3,07 ± 0,82 b
	Henola	60,88 ± 5,93 b	75,73 ± 0,92 bc	20,14 ±0,64 b	4,14 ± 0,85 a
	Santhica 27	62,24 ± 3,73 ab	75,67 ± 1,96 bc	21,47 ±1,75 a	2,86 ± 0,85 b
	Santhica 70	62,18 ± 3,25 ab	77,23 ± 1,07 a	19,87 ±0,70 b	2,90 ± 0,55 b
	Earlina 8fc	55,31 ± 10,96 c	76,28 ± 0,78 ab	19,96 ± 0,69 b	3,76 ± 0,70 a
	Kompolti	63,97 ± 4,25 a	76,35 ± 1,16 ab	20,47 ± 1,21 ab	3,19 ± 0,70 b
	Finola	64,01 ± 3,75 a	74,63 ± 2,60 c	21,45 ± 1,70 a	3,92 ± 1,30 a
Zbiór kwiatów	ze zbiorem kwiatów	62,34 ± 5,96 b	76,04 ± 1,75	20,42 ± 1,36	3,55 ± 1,00 a
	bez zbioru kwiatów	60,43 ± 6,35 a	76,18 ± 1,79	20,56 ± 1,34	3,26 ± 0,92 b
Rok	2023	62,00 ± 2,93 b	75,07 ± 1,87 c	20,74 ± 1,45 a	4,19 ± 1,00 a
	2024	56,33 ± 7,55 c	77,34 ± 1,31 a	19,89 ± 1,26 b	2,77 ± 0,70 c
	2025	65,82 ± 2,31 a	75,92 ± 1,26 b	20,82 ± 1,15 a	3,26 ± 0,53 b

* a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Łodygi odmian Fibror 79 i Futura 75 posiadały średnią W równą 57,60% w okresie dojrzałości nasion (Mussig i Beaugrand 2025). W niniejszym eksperymencie podobny wynik w okresie zbioru osiągnęła jedynie Earlina 8fc (55,31%), a W pozostałych odmiana były wyższe (60,88−64,01%). Jednakże W były niższe w porównaniu do konopi uprawianych na długie włókno (zbiór w momencie kiedy łodygi nadal zachowują liście w górnej jednej trzeciej swojej wysokości), tj. 75−80% (Bruce i in. 2005). Także częściowo w porównaniu do konopi zbieranych, kiedy pojawiły się pierwsze dojrzałe nasiona (średnia W dla dziewięciu odmian wyniosła 60,8−70,6% w zależności od roku) (Jankauskiene i Gruzdeviene 2015).

Najwyższą VM odnotowano u Santhica 70 (77,23% s.m.; grupa „a"), natomiast istotnie najniższą, o ok. 3,4%, dla Finola („c") (tab. 18). W roku 2024 VM była istotnie najwyższa (77,34%). Z kolei FC osiągnęła najwyższe wartości u Santhica 27 i Finola (odpowiednio 21,47% i 21,45% s.m.; „a"), a najniższe o ok. 7,4% u Santhica 70 („b"). W ujęciu roku FC był najwyższy w 2025 (20,82% s.m.), a najniższy w 2024 (różnica 0,9 pp).

Dla słomy konopi jeszcze wyższą VM, a jednocześnie niższy FC uzyskali Chen i in. (2022), tj. VM = 81,12, FC = 16,21% s.m. Odwrotnie, jeszcze niższą VM i wyższą FC, odnotowano w przypadku łodyg odmiany Futura 75 (VM = 72,1, FC = 25,2% s.m.) (Marrot i in. 2022). W obu przypadkach nie podano na jakim etapie rozwojowym konopi pobrano próbki.

Silne zróżnicowanie odmianowe wykazała A. Najwyższą zawartość stwierdzono dla Henola oraz Finola (4,14 and 3,92% s.m.; grupa „a"), czyli dla odmian morfologicznie najniższych, a tym samym o krótkich łodygach, których znaczną długość pokrywa wiecha (odmiany kwietno-nasienne) i o najkrótszym cyklu rozwojowym. Grupę „b" o istotnie najniższej A utworzyły najbardziej ze sobą spokrewnione odmiany (tab. 2) − Santhica 27 i Santhica 70, przy czym było to ok. 26−31% mniej względem „a". Są to odmiany wysokie, a tym samym o długich łodygach, których wiechy nie pokrywają znacznych ich długości, i o dłuższym cyklu rozwojowym (odmiany często określane jako dedykowane produkcji biomasy czy włókna). Dziwi fakt, że najniższa A została stwierdzona w Kompolti, gdyż była to odmiana najwyższa, a tym samym o najdłuższych łodygach, i o najdłuższych okresie wegetacji (często określana jako odmiana biomasowa czy najbardziej „włóknodajna" odmiana świata). Zbiór kwiatów istotnie zwiększył A (3,55 vs. 3,26% s.m.). Ogólnie rzecz biorąc, w okresie kwitnienia zmniejsza się dynamika wzrostu łodygi, a jednocześnie rośnie translokacja składników do wiechy (Heard i in. 2010, Saloner i Bernstein 2023). Zbiór kwiatów pozbawił rośliny docelowego odbiorcy minerałów, a zarazem mógł zadziałać stymulująco na ich pobór (obserwowano rozwój pędów bocznych, a tym samym wiech, w części szczytowej

roślin). Prawdopodobnie zbiór kwiatów zmienił „architekturę” i alokację minerałów między organami, czego efektem była zwiększona A w łodygach. Jeśli chodzi o rok, to najwyższa A wystąpiła w 2023 (4,19% s.m.), a najniższe, o ok. 34%, w 2024.

Niższą A odnotowano dla łodyg konopi przemysłowych z certyfikowanego gospodarstwa ekologicznego, zlokalizowanego we Włoszech (2,46% s.m., nie podano odmiany) (Cardarelli i in. 2025). Niemal identyczna A jak u Kompolti została oznaczona w łodygach odmiany Eletta campana (3,2% s.m.) (Branca i in. 2017). Z kolei w badaniach Kumar i in. (2023) A w łodygach konopi pozyskanych w Kanadzie (nie podano odmiany) wyniosła 3,56% s.m. i zmieściła się w przedziale dla zbadanych w niniejszym badaniu odmian.

4.6.2. Skład elementarny

Odmiana zróżnicowała istotnie zawartość azotu (N) i zawartość chloru (Cl), przy czym N został zróżnicowany silniej (cztery grupy jednorodne dla N vs. dwie grupy dla Cl) (tab. 19). Jednocześnie rok istotnie wpłynął na wszystkie analizowane pierwiastki, potwierdzając, że warunki sezonu wegetacyjnego w większym stopniu niż genotyp kształtowały skład elementarny łodyg.

Tabela 19. Skład elementarny łodyg konopi w zależności od odmiany i roku.

Źródło zmienności	Obiekt	C (% s.m.)	H (% s.m.)	S (% s.m.)	N (% s.m.)	Cl (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	47,32 ± 1,78	5,47 ± 0,35	0,033 ± 0,023	0,66 ± 0,20 cd	0,116 ± 0,045 b
	Henola	47,05 ± 1,94	5,47 ± 0,32	0,029 ± 0,017	0,82 ± 0,21 b	0,146 ± 0,077 ab
	Santhica 27	47,76 ± 2,88	5,43 ± 0,40	0,035 ± 0,031	0,59 ± 0,21 d	0,140 ± 0,074 ab
	Santhica 70	47,20 ± 2,63	5,41 ± 0,39	0,037 ± 0,030	0,56 ± 0,15 d	0,152 ± 0,069 a
	Earlina 8fc	47,98 ± 2,57	5,50 ± 0,29	0,027 ± 0,015	0,74 ± 0,30 bc	0,145 ± 0,072 ab
	Kompolti	48,24 ± 2,28	5,54 ± 0,37	0,032 ± 0,017	0,57 ± 0,14 d	0,116 ± 0,045 b
	Finola	47,65 ± 2,51	5,43 ± 0,40	0,041 ± 0,020	0,98 ± 0,38 a	0,161 ± 0,095 a
Rok	2023	47,95 ± 2,30 a	5,43 ± 0,23 b	0,029 ± 0,011 b	0,94 ± 0,29 a	0,164 ± 0,051 b
	2024	48,13 ± 2,21 a	5,86 ± 0,06 a	0,018 ± 0,005 c	0,48 ± 0,14 c	0,183 ± 0,064 a
	2025	46,72 ± 2,41 b	5,10 ± 0,16 c	0,053 ± 0,028 a	0,67 ± 0,16 b	0,071 ± 0,035 c

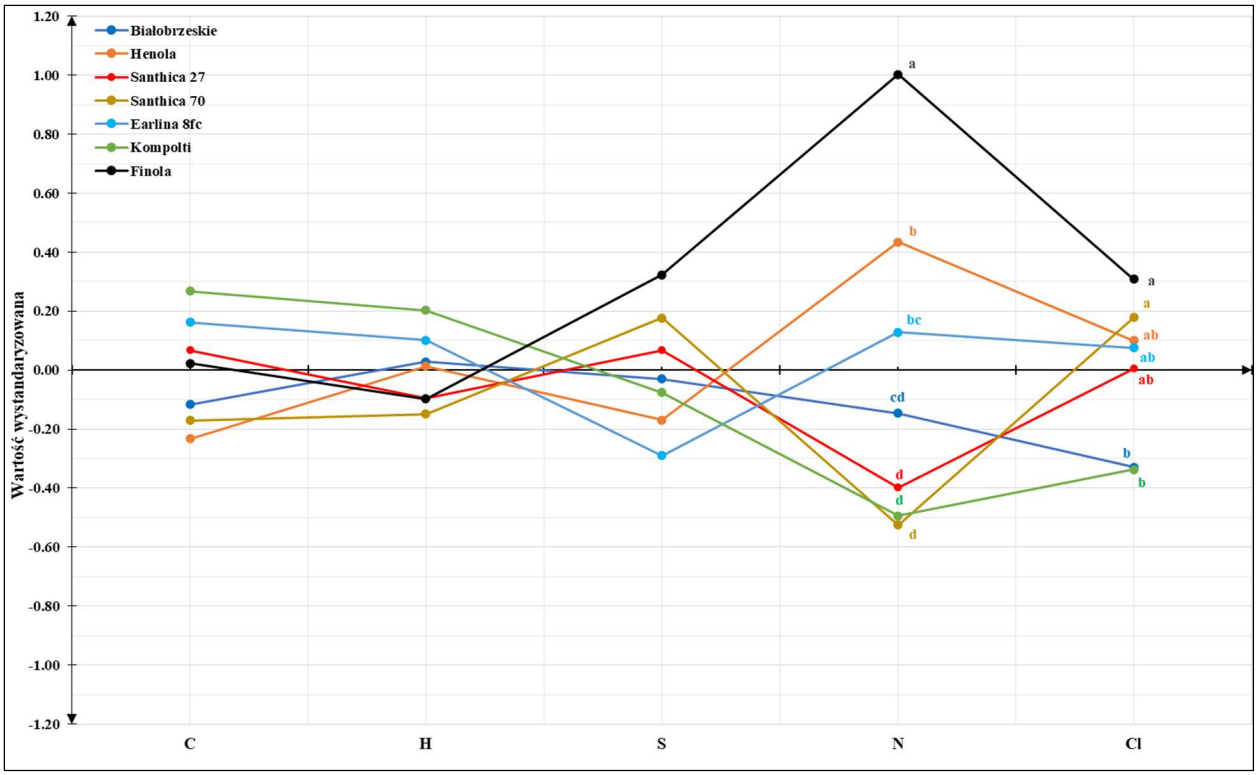
***** a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności;

± – SD.

Istotnie najwyższą N odnotowano u odmiany Finola (0,98% s.m.; grupa „a”), podczas gdy Santhica 27, Santhica 70 i Kompolti posiadały najniższą zawartość tego pierwiastka – ok. 40−43% mniej (tab. 19). Z kolei Cl była najwyższa również u Finola, ale też u Santhica 70, które utworzyły grupę „a” (0,161 i 0,152% s.m., odpowiednio). Przeciwstawna „b” (Białobrzeskie i Kompolti) zawierała 24−28% mniej Cl. Fakt najwyższej koncentracji N i Cl u Finola nie jest zaskakujący, gdyż w analizowanym doświadczeniu była to odmiana o najkrótszym cyklu rozwojowym (średnio 107 dni) oraz była to odmiana najniższa. Również najniższe stężenia tych dwóch pierwiastków w przypadku Kompolti nie dziwią (odmiana o najdłuższy cyklu rozwojowym – średnio 157 dni i jednocześnie odmiana najwyższa). W roku 2024 odnotowano najwyższą C (48,13% s.m.; ta sama grupa co dla 2023), H (5,86% s.m.) i Cl (0,183% s.m.), przy jednocześnie najniższych S (0,018% s.m.) i N (0,48% s.m.). Najniższą C (46,72% s.m.), H (5,10% s.m.) i Cl (0,071% s.m.), przy jednoczesnym wzroście S do maksimum (0,053% s.m.) odnotowano w 2025.

W badaniu Jha i in. (2024) przeanalizowano słomę konopi (lokalne gospodarstwo rolne w Kanadzie, odmiany nie podano), uzyskując skład C/H/S/N równy 43,3/6,3/0,1/0,7% s.m. Jedynie N z tego badania był porównywalny do średniej N dla Earlina 8fc (tab. 19). Frankowski i Sieracka (2021) poddali z kolei analizie słomę odmiany Henola, uzyskując N i H równe 0,52 i 5,66% s.m. Był to zatem wyniki zbliżony pod kątem średniej N względem Santhica 27, Santhica 70 i Kompolti (tab. 19). Jednakże H była już wyższa w porównaniu do średnich dla poszczególnych odmian. Z kolei w innym badaniu (Vaisanen i in. 2019) podano S dla łodyg Futura 75 (0,0417% s.m.) co było wartością zbliżoną do średniej Finola. Paździerze konopne, a więc jedne z elementów budowy łodyg, posiadały wyższą C i H (49,6 i 5,9% s.m., odpowiednio) (Recio-Ruiz i in. 2025) w porównaniu do średnich wartości dla zbadanych łodyg. Posiadały również znacznie niższą N (0,2% s.m.) (Recio-Ruiz i in. 2025). Obecnie brakuje w literaturze pełnych analiz składu pierwiastkowego łodyg konopi, a biosurowce typu słoma czy paździerz nie stanowią tego samego materiału co łodygi.

Profile odmian w aspekcie składu elementarnego kształtowały N i Cl (rys. 9). Najmocniej odstawała Finola – zdecydowanie najwyższe N przy wysokim Cl. Na przeciwnym biegunie znalazła się Kompolti – jako jedyna posiadała zarówno niski N jak i niski Cl. Bardzo dobrze oddaje to realia „na polu”, gdyż ogólnie rzecz biorąc, Finola to odmiana najniższa o najkrótszym cyklu rozwojowym a Kompolti wręcz przeciwnie – najwyższa i o najdłuższym cyklu rozwojowym (spośród wszystkich w niniejszym doświadczeniu).



Rysunek 9. Standaryzowany profil analizy elementarnej (C, H, S, N i Cl) łodyg konopi w przekroju odmian. Wartości dodatnie i ujemne wskazują odpowiednio poziomy powyżej i poniżej średniej względem całego zbioru danych. Różne litery obok punktów oznaczają statystycznie istotne różnice między odmianami w obrębie danego pierwiastka (test Tukeya, $p < 0,05$). Linie łączące punkty przedstawiono wyłącznie jako pomoc wizualną i nie oznaczają ciągłości między zmiennymi.

4.6.3. Właściwości energetyczne

Ciepło spalania (HHV) i wartość opałowa (LHV) przy założonej wilgotności 15% istotnie różniły się między odmianami, przy czym Finola osiągnęła najwyższe wartości (HHV = 18,80 MJ kg^{-1} s.m., LHV = 14,69 MJ kg^{-1}; grupa „a") (tab. 20 i rys. 8). Natomiast Henola charakteryzowała się najniższymi (ok. 2% niższe HHV i LHV w porównaniu do Finola). Santhica 27 i Santhica 70 należały do grup o relatywnie wysokich wartościach energetycznych (grupa ab), podczas gdy Białobrzeskie, Earlina 8fc i Kompolti zajmowały pozycje pośrednie (bc–cd). Abstrahując od tego, różnice między odmianami nie były znaczące (przedział dla LHV 14,32−14,69 MJ kg^{-1}). Czynnik roku również istotnie wpłynął na właściwości termofizyczne. Lata 2024 i 2025 charakteryzowały się wyższymi wartościami HHV (18,70 i 18,63 MJ kg^{-1} s.m.) w porównaniu z 2023 (HHV niższe o 0,23−0,26 MJ kg^{-1} s.m.). Dla LHV nastąpił

sekwencyjny istotny wzrost od 2023 przez 2024 do 2025 (14,38 vs. 14,52 vs. 14,60 MJ kg^{-1}), co wskazuje, że sezon wegetacyjny wpłynął na potencjał energetyczny łodyg.

Tabela 20. Właściwości energetyczne łodyg konopi w zależności od odmiany i roku.

Źródło zmienności	Obiekt	HHV (MJ kg^{-1} s.m.)	LHV (MJ kg^{-1}) przy 15% wilgotności
Odmiana	Białobrzeskie	18,55 ± 0,21 bcd	14,47 ± 0,19 bcd
	Henola	18,38 ± 0,21 d	14,32 ± 0,18 d
	Santhica 27	18,68 ± 0,29 ab	14,58 ± 0,21 ab
	Santhica 70	18,65 ± 0,23 ab	14,56 ± 0,17 ab
	Earlina 8fc	18,58 ± 0,19 bc	14,48 ± 0,16 bc
	Kompolti	18,47 ± 0,17 cd	14,39 ± 0,14 cd
	Finola	18,80 ± 0,24 a	14,69 ± 0,24 a
Rok	2023	18,44 ± 0,21 b	14,38 ± 0,18 c
	2024	18,70 ± 0,22 a	14,52 ± 0,18 b
	2025	18,63 ± 0,25 a	14,60 ± 0,22 a

*a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Łodygi Henola charakteryzowały się zbliżoną HHV do całych roślin odmiany Felina 32 (18,37 MJ kg^{-1}) (Zvicevicius i in. 2024). HHV odmian (tab. 20) były zbliżone do średniej HHV pędów konopi (18,5 MJ kg^{-1}, średnia dla odmian Beniko, Bialobrzeskie, Epsilon, Fedora, Felina 32, Futura 75, Santhica 27 and USO 31) (Butkute i in. 2015). Natomiast niższą HHV (17,50 MJ kg^{-1}) stwierdzono dla odpadów konopnych (nie podano odmiany), składających się głównie z łodyg i pędów, pozyskanych z plantacji w Tajlandii (Kanchanatip i in. 2023).

4.6.4. Skład lignocelulozowy i zawartość ekstraktów

Najniższą średnią zawartość celulozy (Cel) odnotowano u Finola i Earlina 8fc (44,35 i 46,24% s.m., odpowiednio; grupa „c"), natomiast najwyższą u Białobrzeskie i Santhica 70 (ok. 7,1−9,2 pp więcej; „a") (tab. 21). Te dwie odmiany wraz z Santhica 27 i Kompolti to odmiany wyższe oraz dedykowane produkcji biomasy i włókna, więc większe poziomy Cel były zgodne z przewidywaniami. Sezon wegetacyjny również istotnie wpłynął na Cel, przy czym najwyższą średnią uzyskano w 2024 (53,19% s.m.), a najniższą w 2023 i 2025 (ok. 3,6 i 4,7 pp mniej, odpowiednio). Zawartość hemicelulozy (Hem) wykazała mniejsze zróżnicowanie między odmianami, jednak Finola i Earlina 8fc (21,46 i 20,52% s.m., odpowiednio) należały do grupy „a" o najwyższych wartościach. Pozostałe odmiany skupiły się w grupie „b" (ok. 0,5−2,3 pp mniej). Najwyższą zawartość ligniny (Lig) odnotowano

u Finoli (11,76% s.m.; „a”), natomiast najniższą u Kompolti („d”; ok. 2,7 pp mniej względem „a”). Czynnik roku przesunął Lig w skali całej populacji – 2024 i 2025 utrzymały wyższe poziomy (10,68 i 10,41% s.m.; „a”) niż 2023 (ok. 0,3−0,8 pp mniej; „b”), co sugerowało silny udział warunków sezonu w „usztywnianiu” łodyg.

Tabela 21. Zawartość celulozy, hemicelulozy, ligniny i substancji ekstrakcyjnych w łodygach konopi w zależności od odmiany i roku.

Źródło zmienności	Obiekt	Cel (% s.m.)	Hem (% s.m.)	Lig (% s.m.)	CWE (% s.m.)	HWE (% s.m.)	OSS (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	53,57 ± 2,47 a	19,13 ± 1,78 b	9,15 ± 0,84 cd	8,49 ± 1,87 c	10,74 ± 2,00 c	7,41 ± 0,93 cd
	Henola	50,51 ± 2,88 b	18,60 ± 1,28 b	9,71 ± 1,06 cd	10,56 ± 1,74 a	13,09 ± 1,81 a	8,52 ± 1,31 b
	Santhica 27	52,54 ± 3,58 ab	19,10 ± 1,72 b	10,46 ± 1,80 abc	8,78 ± 2,76 bc	10,99 ± 2,98 c	6,90 ± 0,88 d
	Santhica 70	53,30 ± 2,91 a	18,67 ± 1,96 b	10,26 ± 1,33 bcd	8,48 ± 2,09 c	10,64 ± 2,26 c	7,13 ± 0,92 d
	Earlina 8fc	46,24 ± 3,58 c	20,52 ± 1,97 a	11,21 ± 1,32ab	9,73 ± 2,08 ab	12,28 ± 2,27 ab	9,76 ± 2,06 a
	Kompolti	52,13 ± 2,95 ab	19,15 ± 1,85 b	9,04 ± 1,74 d	9,08 ± 1,49 bc	11,44 ± 1,57 bc	8,24 ± 1,17 bc
	Finola	44,35 ± 3,07 c	21,46 ± 1,84 a	11,76 ± 1,25 a	10,67 ± 2,28 a	13,36 ± 2,62 a	9,06 ± 1,41 ab
Rok	2023	49,56 ± 4,97 b	18,10 ± 1,32 c	9,59 ± 1,59 b	10,93 ± 1,60 a	13,43 ± 1,89 a	9,34 ± 1,71 a
	2024	53,19 ± 3,88 a	18,97 ± 1,30 b	10,68 ± 1,62 a	7,18 ± 1,42 c	9,41 ± 1,63 c	7,76 ± 1,39 b
	2025	48,38 ± 3,17 b	21,49 ± 1,56 a	10,41 ± 1,54 a	10,09 ± 1,53 b	12,53 ± 1,67 b	7,33 ± 0,82 b

* a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Brakuje w literaturze badań nad zróżnicowaniem składu łodyg konopi przez odmianę czy rok/sezon wegetacyjny. W Australii zdefiniowano skład pędów konopi (nie podano odmiany), otrzymując relację Cel/Hem/Lig wynoszącą 43/14-15/8% s.m. (Keiller i in. 2021). We Włoszech z kolei dla pędów odmiany Futura 75 uzyskano średnią 62,6/17,2/9,8% s.m. (Amaducci i in. 2000), a zatem tylko Lig odpowiadało odmianie Henola z niniejszego eksperymentu. Odmienny skład wykazano dla jednego z dwóch najbardziej typowych, obok paździerza, elementów łodyg konopi przemysłowych – włókna (Cel/Hem/Lig równe 72,1/14,1/8% s.m.) (Nair i in. 2015). Dla włókna pobranego wyłącznie z części środkowej pędu − 66,25/11,88/5,94% s.m. (Liu i in. 2018). Liu i in. (2015) zróżnicowali dodatkowo Lig we włóknie na etapie wczesnego zbioru oraz zbioru późnego (3,4 vs.. 4,8% s.m.). Dla paździerza podawane są z kolei zawartości takie jak 50,3/17,9/17,2% s.m. (Laborel-Preneron i in. 2018). Być może to właśnie odmienne proporcje włókno/paździerz w łodygach różnych odmian albo/i zróżnicowany skład chemiczny tych dwóch elementów łodyg w każdej z odmiana stanowiły o odmiennych profilach lignohemicelulozy.

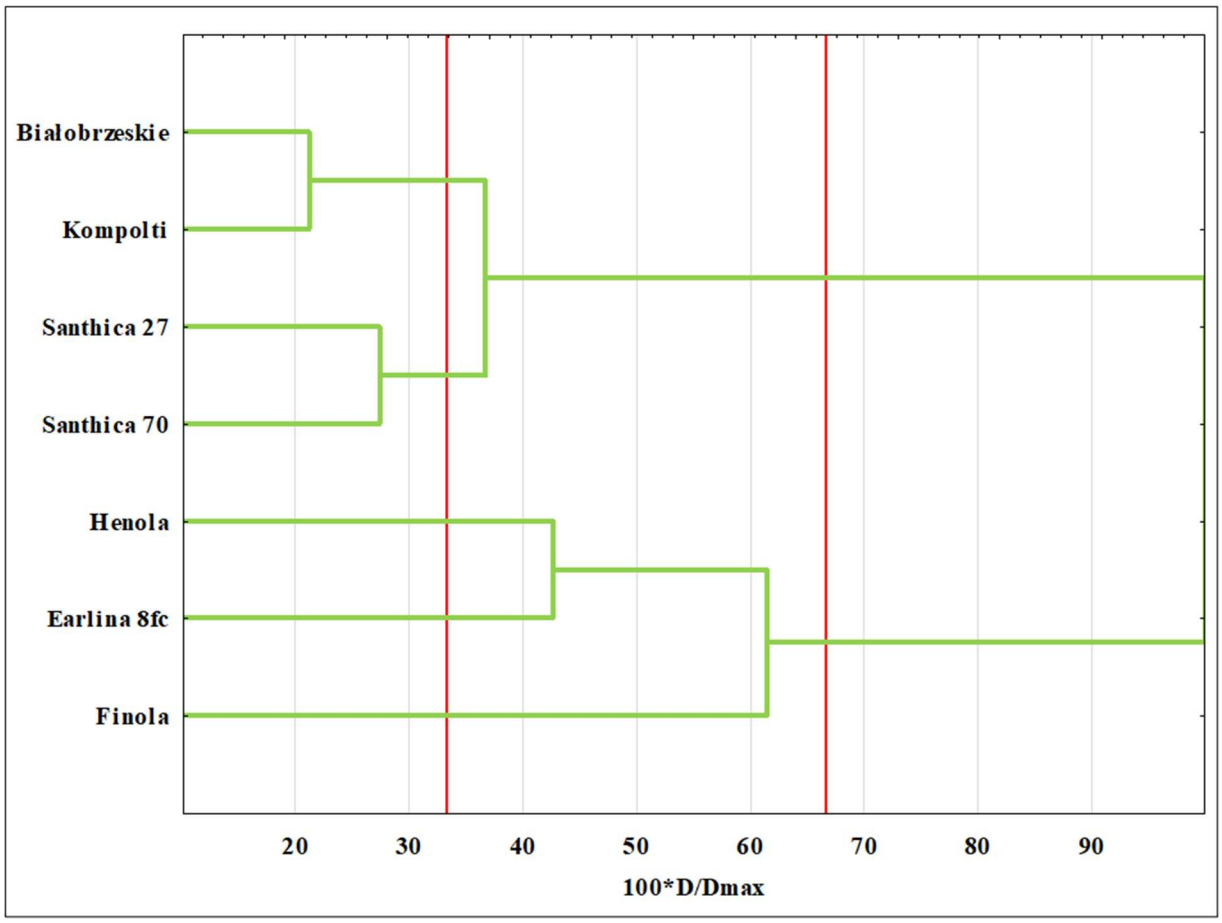
Istotnie najwyższą zawartość związków rozpuszczalnych w zimnej wodzie (CWE) odnotowano u Finola i Henola (10,67 i 10,56% s.m.; grupa „a”), natomiast najniższą o ok. 20−26% u Santhica 70 i Białobrzeskie („c”) (tab. 21). Podobny układ wystąpił dla związków rozpuszczalnych w gorącej wodzie (HWE), gdzie Finola i Henola miały najwyższe poziomy (13,09 i 13,36% s.m.; „a”), a Santhica 70, Białobrzeskie i Santhica 27 najniższe (16−26% mniej względem „a”). Zawartość pozostałych substancji rozpuszczalnych (OSS) osiągnęła najwyższy poziom u Earlina 8fc (9,76% s.m.; „a”), a najniższy u Santhica 27 i Santhica 70 (27−41% mniej względem „a”). Rok silnie zmodyfikował wszystkie frakcje ekstrakcyjne. W 2023 stwierdzono najwyższe wartości CWE, HWE i OSS (wszystkie w „a”), natomiast 2024 charakteryzował się najniższymi poziomami tych składników (grupa „c” dla CWE i OSS, „b” dla HWE). Wskazuje to na wpływ warunków roku uprawy na pulę związków ekstrahowalnych w łodygach konopi.

Sumaryczna zawartość ekstraktów analizowanych odmian zmieściła się w przedziale 17,77−22,42 % s.m.) (tab. 21). Pokrywa się to częściowo z zawartością ekstraktów oznaczoną dla pędów odmiany Futura 75, tj. 11−19% s.m. w zależności od terminu zbioru (związki rozpuszczalne w wodzie = 10−17% s.m. i związki rozpuszczalne w etanolu = 1−2% s.m.) (Kreuger i in. 2011a). Natomiast dla pędów odmiany Tygra łączna zawartość ekstraktów wyniosła mniej, 14,40% s.m. (Zhao i in. 2020b). Również w innych badaniach ekstrakty dla pędów 11 odmian roszonych w polu znalazły się w przedziale niższych wartości, 3,65−11,92% s.m. (w pracy nie odniesiono do istotności różnic pomiędzy odmianami)

(Das i in. 2020). Jednakże w tym przypadku niższą koncentrację ekstraktów można wyjaśnić procesem roszenia w polu, które trwało od trzech do czterech tygodni.

4.6.5. Profile odmian

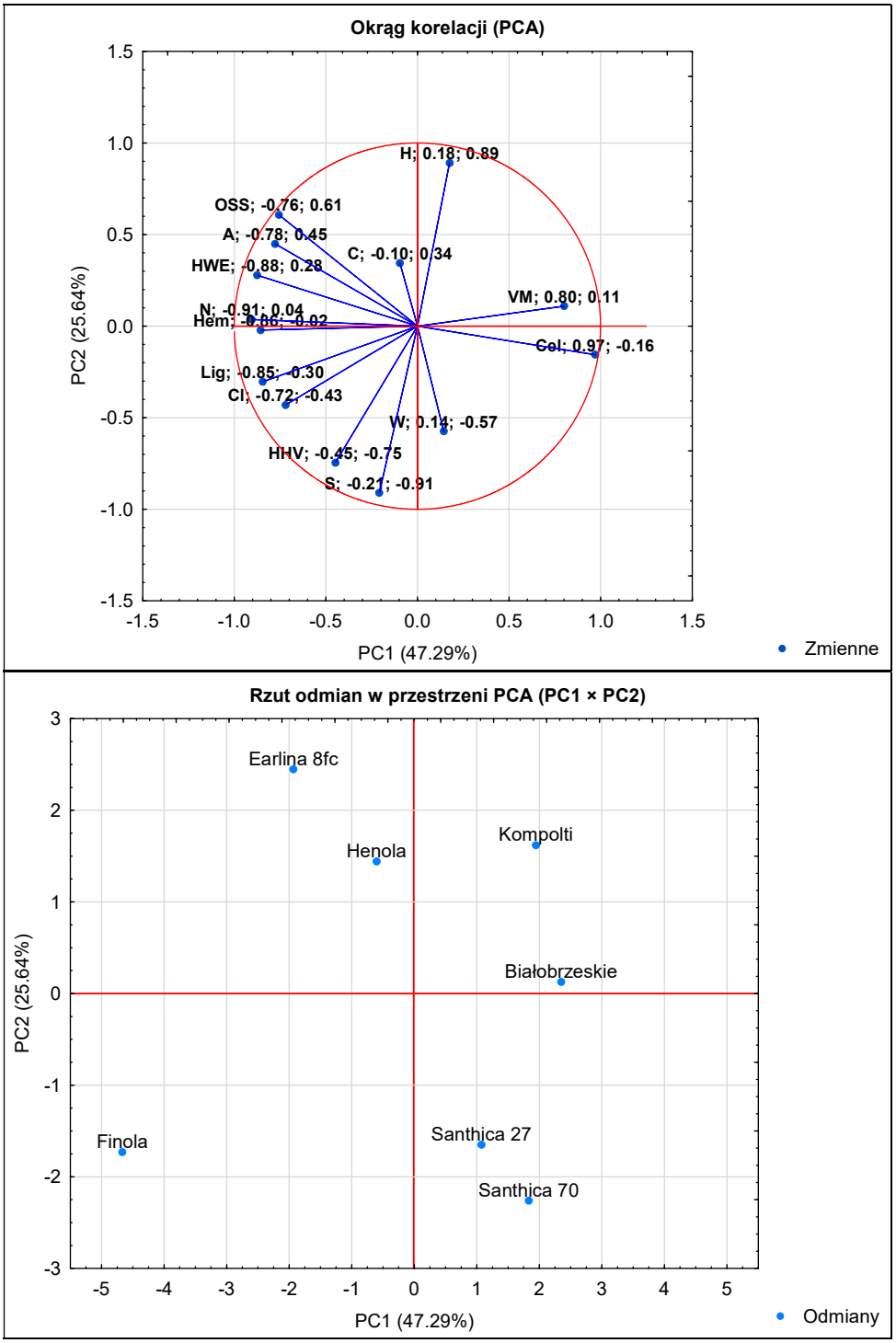
Badane łodygi konopi stworzyły wyraźne grupy podobieństwa, co potwierdziło istnienie zróżnicowania przez odmianę (rys. 10). Przy niższym poziomie odcięcia (ok. 30% D/D_{max}) ujawniono dwie zwarte pary: Białobrzeskie–Kompolti oraz Santhica 27–Santhica 70, co wskazuje na bardzo podobne profile cech w obrębie tych dwóch par. Przy wyższym poziomie aglomeracji (ok. 40% D/D_{max}) kolejną parę utworzyła Henola i Earlina 8fc, natomiast Finola pozostała „najdłużej" odseparowana, łącząc się z Henola i Earlina 8fc dopiero przy wysokim poziomie dystansu (ok. 60% D/D_{max}). Łodygi Finola były zatem najbardziej odmienne od łodyg pozostałych odmian. Generalnie na poziomie 66,6% D/D_{max} wystąpiły dwa klastry. Pierwszy czteroelementowy (bardziej jednorodny) stworzony przez Białobrzeskie, Kompolti, Santhica 27 i Santhica 70. Drugi trzyelementowy (mniej jednorodny), w skład którego weszły Henola, Earlina 8fc i Finola. Pierwszy utworzyły odmiany wyższe, o dłuższym cyklu rozwojowym oraz dedykowane produkcji biomasy czy włókna. Drugi odmiany niższe, o krótszy cyklu rozwojowym oraz dedykowane produkcji kwiatów czy nasion (można je określić jako kwietno-nasienne). To zaskakujące, gdyż analizowaliśmy wyłącznie skład chemiczny łodyg, a w pewien sposób „oddał" on różnice między grupami odmian.



Rysunek 10. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa łodyg konopi. Pionowa czerwona linia oznacza kryterium Sneatha – 0,66 D_{max} i 0,33 D_{max}. D – odległość wiązania; D_{max} – maksymalna odległość wiązania.

Spośród wszystkich analizowanych par łodygi odmian Białobrzeskie i Kompolti były do siebie najbardziej podobne (żadna inna para nie wykazała tak małego dystansu aglomeracyjnego). To w pewien sposób przewidywalne, gdyż Kompolti stanowiła jedną z form rodzicielskich użytych do wyhodowania Białobrzeskie.

Finola najbardziej odstawała od pozostałych m.in. ze względu na jednocześnie istotnie najwyższą N, Cl, Hem, Lig, HWE, OSS i HHV (rys. 11). Henola i Earlina 8fc miały w porównaniu do niej niższą HHV czy W. Ten trzyobiektowy klaster odstawał od drugiego, czteroobiektowego (Kompolti, Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70) m.in. ze względu na niższe VM, Cel przy równocześnie wyższym A, N, Cl, Hem, HWE czy OSS.



Rysunek 11. Analiza głównych składowych (PCA) podsumowująca zależności między cechami jakości łodyg oraz różnice między odmianami. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji PCA (ładunki czynnikowe) dla analizowanych zmiennych; długość wektorów odzwierciedla jakość reprezentacji na płaszczyźnie PC1–PC2, a kąty między wektorami wskazują na korelacje. W dolnym panelu zaprezentowano wykres wyników PCA dla odmian.

4.6.6. Efekt interakcji

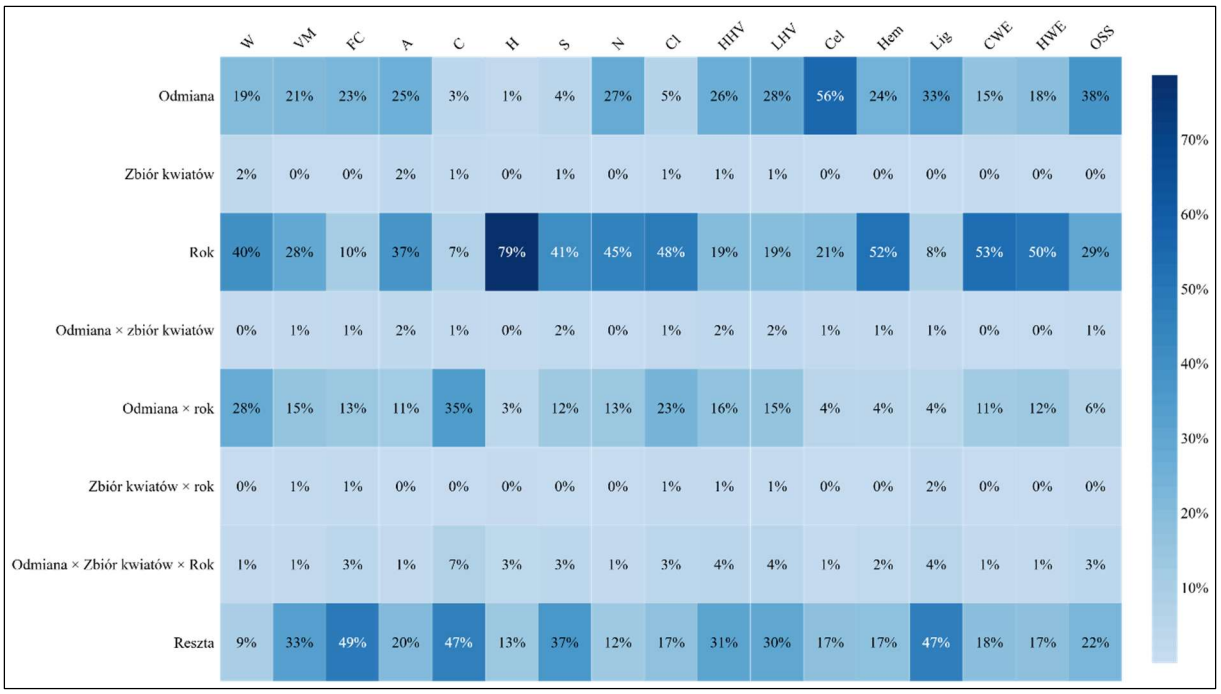
Interakcja odmiana × rok była istotna statystycznie dla większości analizowanych cech, za wyjątkiem H, Cel, Hem i Lig, co wskazuje, że wpływ odmiany na cechy łodyg zmieniał się w zależności od roku (tab. 22). Interakcje odmiana × zbiór kwiatów, zbiór kwiatów × rok oraz interakcja trójczynnikowa nie były istotne dla żadnej cechy.

Tabela 22. Wartości *p* analizy wariancji (ANOVA) dla dwu- i trójczynnikowych interakcji między odmianą, zbiorem kwiatów i rokiem w odniesieniu do badanych cech.

Cecha	Odmiana × zbiór kwiatów	Odmiana × rok	Zbiór kwiatów × rok	Odmiana × zbiór kwiatów × rok
W	0,665	<0,001*	0,446	0,533
VM	0,875	0,001*	0,498	0,994
FC	0,871	0,046*	0,453	0,929
A	0,168	<0,001*	0,623	0,976
HHV	0,443	<0,001*	0,222	0,654
LHV	0,455	<0,001*	0,347	0,457
C	0,952	<0,001*	0,915	0,417
H	0,841	0,061	0,261	0,196
S	0,656	0,014*	0,731	0,799
N	0,900	<0,001*	0,686	0,767
Cl	0,348	<0,001*	0,065	0,18
Cel	0,511	0,099	0,441	0,997
Hem	0,649	0,127	0,599	0,765
Lig	0,904	0,804	0,169	0,807
CWE	0,939	<0,001*	0,851	0,969
HWE	0,991	<0,001*	0,887	0,951
OSS	0,896	0,034*	0,416	0,503

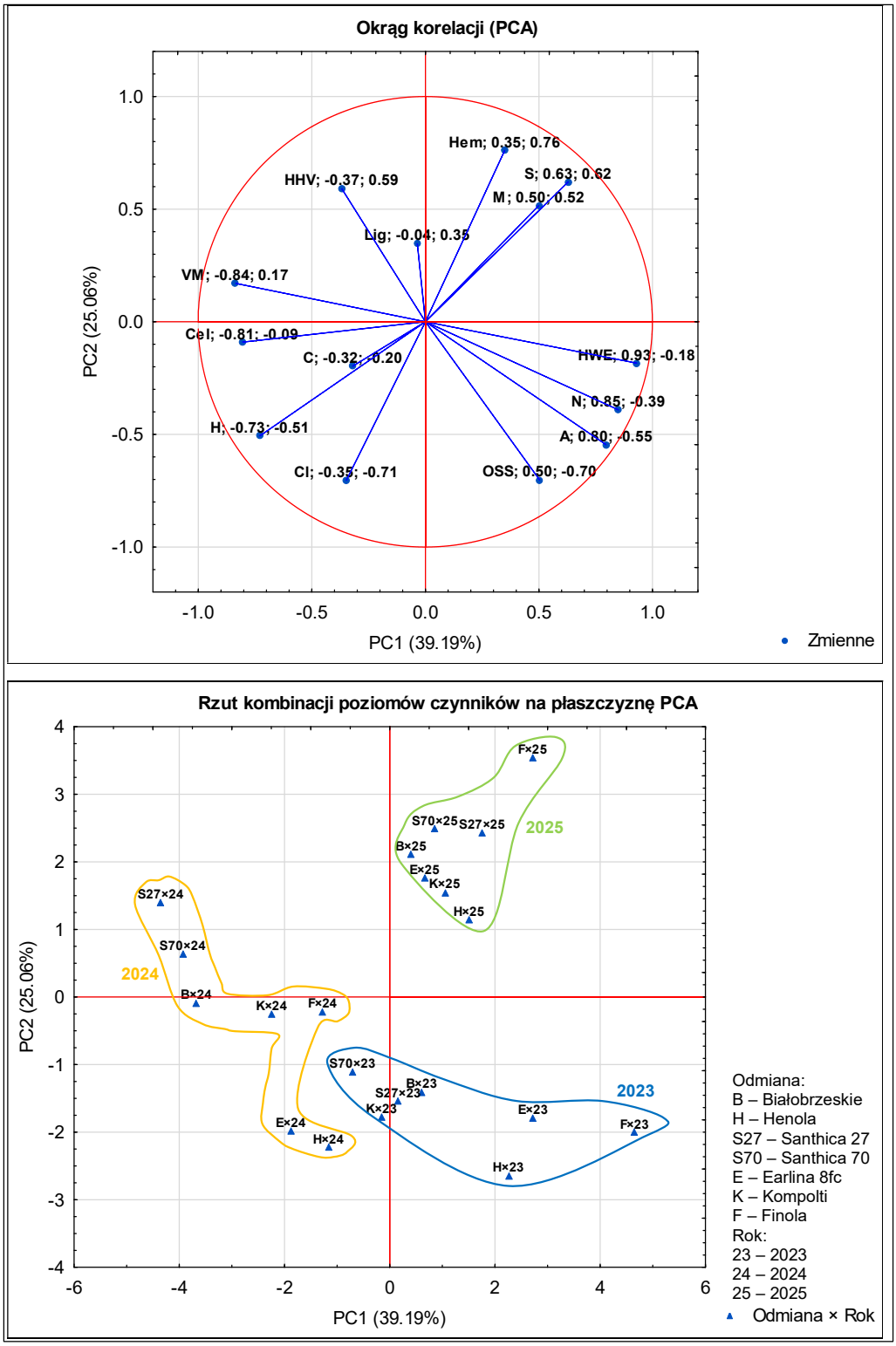
*wartości istotne statystycznie ($p < 0,05$).

Interakcje, za wyjątkiem odmiana × rok, stanowiły marginalne źródło zmienności analizowanych cech (rys. 12). Interakcja odmiana × rok stanowiła w znacznym stopniu o zmienności W, C i Cl. Natomiast jednostkowy czynnik główny rok był dominującym źródłem zmienności dla większości cech łodyg, co wskazało na silny wpływ sezonu wegetacyjnego. Odmiana miała również istotny, lecz wtórny udział, najbardziej widoczny w porównaniu do roku dla FC, HHV, LHV, Cel, Lig i OSS.



Rysunek 12. Mapa cieplna przedstawiająca procentowy udział głównych czynników (odmiany, zbioru kwiatów i roku) oraz ich interakcji w całkowitej wariancji cech łodyg. Intensywność barwy wzrasta wraz z wielkością efektu. „Reszta" oznacza wariancję niewyjaśnioną.

Wykres PCA dla kombinacji odmiana × rok uwidocznił czytelne grupowanie wyników przede wszystkim według roku, a dopiero potem według odmian (rys. 13). Łodygi z lat 2023, 2024 i 2025 tworzyły odrębne skupienia w przestrzeni PC1–PC2, co oznacza, że zmienność między latami była silniejsza niż różnice między odmianami w obrębie tego samego roku. Przykładowo w roku 2025 łodygi (odmiana × rok) były przesunięte w kierunku wektorów Hem i S na płaszczyźnie PC1–PC2, co wskazuje na relatywnie wyższy udział tych dwóch składników w porównaniu z pozostałymi latami. Jednocześnie rozrzut punktów w obrębie poszczególnych lat wskazał, że odmiany zachowywały odrębne profile cech, które były modyfikowane przez rok/sezon wegetacyjny.



Rysunek 13. Analiza PCA podsumowująca zależności między cechami jakości łodyg oraz różnice między kombinacjami odmiana × rok. W górnym panelu przedstawiono koło korelacji PCA (ładunki czynnikowe), a w dolnym wyniki dla kombinacji odmiana × rok (B×23…F×25), z ręcznie dodanymi okręgami ułatwiającymi wizualną identyfikację tendencji do grupowania.

4.7. Ogólna charakterystyka składu i właściwości łodyg

Szerokim zakresem zmienności cechowała się W (35,75–69,70%), jednak umiarkowane zróżnicowanie potwierdziło SD wynoszące 6,21% i CV równy 10,12% (tab. 23). Połowa obserwacji zmieściła się między 58,85% (Q1) a 65,23% (Q3), co świadczy o stosunkowo stabilnym poziomie tej cechy.

VM była bardzo stabilna – średnia 76,11% s.m., a rozrzut niewielki (SD = 1,77% s.m.; CV = 2,32%). FC również był dość wyrównany – średnia 20,49% s.m., zmienność słaba (SD = 1,35% s.m.; CV = 6,59%). Z kolei średnia A była równa 3,41% s.m., ale zmienność była już wyraźna (SD = 0,96 s.m., CV = 28,33%), a przedział wartości szeroki (1,51–6,92% s.m.). Była cechą mocno różnicującą łodygi (część próbek miało prawie dwa razy większą zawartość względem przedziału Q1–Q3).

Umiarkowaną zmienność wykazała C (CV = 4,98%), a wartości koncentrowały się w wąskim przedziale międzykwartylowym (45,76–49,15% s.m.), co wskazywało na jego stabilny udział. Podobny poziom wykazała H (CV = 6,47%). Z kolei S odznaczyła się najwyższą zmiennością (CV = 68,03%) oraz szerokim zakresem (0,006–0,109% s.m.), co oznaczało, że S silnie różnicowała łodygi. Duża zmienność wykazała też N (CV = 39,29%), a wartości maksymalne były ponad dwukrotnie wyższe od mediany. Część próbek zawierała zatem podwyższoną N. Mimo niskich wartości bezwzględnych (0,023–0,331% s.m.) Cl była drugą najbardziej zróżnicowaną cechą (CV = 50,51%).

HHV charakteryzowała się bardzo małą zmiennością (SD = 0,25 MJ kg^{-1} s.m., CV = 1,36%), a zakres międzykwartylowy był wąski (18,43–18,72 MJ kg^{-1} s.m.), co wskazało na wysoką jednorodność energetyczną łodyg.

Wokół średniej 50,38% s.m. skoncentrowała się Cel, a połowa wyników zmieściła się w przedziale 47,66–54,25% s.m. Zmienność była słaba (CV = 9,00%), choć skrajne próbki rozszerzały zakres do 38,63–59,50% s.m. Na poziomie średnim 19,52% s.m. utrzymała się Hem, przy kwartylach 18,11–20,57% s.m. i umiarkowanym rozrzucie (CV = 10,27%). Z kolei Lig osiągnęła średnią 10,23% s.m., przy typowym zakresie 8,92–11,16% s.m. i umiarkowanej zmienności (CV = 16,02%). Jednocześnie rozpiętość od 6,63 do 15,70% s.m. wskazywała na obecność bardziej „odległych” próbek.

Tabela 23. Wybrane wskaźniki analizy statystycznej dla badanych cech (*N ważnych* = 126).

Cecha	Średnia	Mediana	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Q1	Q3	SD	CV (%)
W (%)	61,38	62,78	35,75	69,70	58,85	65,23	6,21	10,12
VM (% s,m,)	76,11	76,30	69,68	79,58	75,20	77,17	1,77	2,32
FC (% s,m,)	20,49	20,25	18,21	24,49	19,47	21,01	1,35	6,59
A (% s,m,)	3,41	3,27	1,51	6,92	2,85	3,81	0,96	28,33
C (% s,m,)	47,60	47,66	42,53	54,26	45,76	49,15	2,37	4,98
H (% s,m,)	5,46	5,42	4,72	6,03	5,17	5,84	0,35	6,47
S (% s,m,)	0,033	0,024	0,006	0,109	0,017	0,042	0,023	68,03
N (% s,m,)	0,70	0,66	0,31	1,70	0,55	0,80	0,28	39,29
Cl (% s,m,)	0,139	0,130	0,023	0,331	0,085	0,190	0,070	50,51
HHV (MJ kg^{-1} s,m,)	18,59	18,57	17,85	19,25	18,43	18,72	0,25	1,36
LHV (MJ kg^{-1})	14,50	14,49	13,90	15,15	14,36	14,64	0,21	1,48
Cel (% s,m,)	50,38	50,41	38,63	59,50	47,66	54,25	4,54	9,00
Hem (% s,m,)	19,52	19,34	15,85	25,16	18,11	20,57	2,00	10,27
Lig (% s,m,)	10,23	10,22	6,63	15,70	8,92	11,16	1,64	16,02
CWE (% s,m,)	9,40	9,32	4,35	15,02	8,27	11,01	2,21	23,48
HWE (% s,m,)	11,79	11,56	6,14	18,39	10,67	13,52	2,44	20,68
OSS (% s,m,)	8,15	7,91	4,58	16,39	7,03	9,00	1,60	19,67

Na poziomie średniej 9,40% s.m. ukształtowała się CWE, a typowe wartości (Q1–Q3) zmieściły się w zakresie 8,27–11,01% s.m. Silna zmienność (CV = 23,48%) oraz szeroki przedział min–max (4,35–15,02% s.m.) wskazał na wyraźne różnice między próbkami łodyg. HWE osiągnęła przeciętnie 11,79% s.m., z połową obserwacji między 10,67 a 13,52% s.m. Rozrzut był silny, porównywalny z CWE (CV = 20,68%), a wartości skrajne (6,14–18,39% s.m.) sugerowały zróżnicowaną podatność materiału na ekstrakcję w gorącej wodzie. Natomiast OSS scharakteryzowała się średnią 8,15% s.m. przy relatywnie wąskim zakresie 7,03–9,00% s.m. Mimo to obecność wartości od 4,58 do 16,39% s.m. oraz CV = 19,67% wskazywała, że OSS również potencjalnie istotnie zróżnicowała łodygi.

4.8. Skład i właściwości stałej pozostałości po hydrodestylacji

4.8.1. Skład przybliżony

Stała pozostałość po hydrodestylacji pod względem W nie była istotnie zróżnicowana przez żaden z czynników głównych (odmiana, zbiór kwiatów) oraz interakcje pomiędzy nimi (tab. 24). Pozostałe parametry z zakresu analizy proksymalnej takie jak VM, FC i A były istotnie różnicowane jedynie przez odmianę. Średnia W stałej pozostałości po hydrodestylacji wyniosła 87,27%, przy SD = 1,10% (tab. 25).

Tabela 24. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) – wartości *p* dla badanych cech.

Cecha	Odmiana (C)	Zbiór kwiatów (F)	C × F
W	0,082	0,158	0,530
VM	<0,001*	0,250	0,336
FC	<0,001*	0,239	0,897
A	<0,001*	0,178	0,369
HHV	<0,001*	0,503	0,550
LHV	<0,001*	0,515	0,592
C	<0,001*	0,690	0,599
H	0,004*	0,690	0,784
S	0,008*	0,088	0,499
N	<0,001*	0,256	0,423
Cl	0,030*	0,856	0,639
Cel	0,001*	0,752	0,572
Hem	0,001*	0,075	0,333
Lig	<0,001*	0,197	0,376
CWE	<0,001*	0,029*	0,512
HWE	<0,001*	0,015*	0,581
OSS	<0,001*	0,239	0,897

*wartości istotne statystycznie ($p < 0,05$).

Tabela 25. Skład proksymalny stałej pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	W (%)	VM (% s.m.)	FC (% s.m.)	A (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	87,16 ± 0,71	67,22 ± 1,24 ab	14,20 ± 0,17 b	18,59 ± 1,19 bc
	Henola	87,63 ± 0,62	63,37 ± 1,69 b	14,30 ± 0,77 bc	23,32 ± 2,37 b
	Santhica 27	87,68 ± 0,52	66,11 ± 2,35 ab	14,69 ± 0,75 ab	19,21 ± 1,84 bc
	Santhica 70	86,26 ± 0,98	67,86 ± 0,74 a	15,68 ± 1,00 a	16,46 ± 0,98 c
	Earlina 8fc	87,86 ± 0,44	65,45 ± 1,88 ab	13,42 ± 0,31 bc	21,13 ± 2,03 bc
	Kompolti	86,66 ± 2,02	65,41 ± 3,00 ab	14,36 ± 0,87 ab	20,22 ± 3,72 bc
	Finola	87,66 ± 0,96	58,35 ± 4,36 c	12,52 ± 0,76 c	29,13 ± 4,95 a
Zbiór kwiatów	ze zbiorem kwiatów	87,05 ± 1,36	64,39 ± 4,52	13,88 ± 1,21	21,73 ± 5,44
	bez zbioru kwiatów	87,50 ± 0,73	65,26 ± 2,83	14,16 ± 1,15	20,57 ± 3,70
Średnia		87,27 ± 1,10	64,83 ± 3,75	14,02 ± 1,18	21,15 ± 4,63

* a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

VM była istotnie różnicowana jedynie przez odmianę, a różnica pomiędzy odmianami należącymi wyłącznie do skrajnych grup jednorodnych („a” i „c”) wynosiła 9,5 pp (tab. 25), czyli ponad 16%. Największą VM odznaczyła się Santhica 70 (67,86% s.m.), a najniższą Finola (58,35% s.m.). Średnia dla pozostałości wynosiła 64,83% s.m., przy SD równym 3,75% s.m. Największa zróżnicowanie wystąpiło w przypadku odmiany Finola (SD = 4,36% s.m.), a najmniejsze w pozostałości Santhica 70 (0,74% s.m.).

W biomasie VM może wynosić nawet 90% s.m., przy czym większe VM powoduje wytwarzanie większych ilości biogazu jak również sprzyjają procesowi pirolizy (sprzyja powstawaniu bio-oleju i gazu syntezowego) (Özyuğuran i Yaman 2017, Madhu i in. 2020, Azeta i in. 2021, Allende i in. 2023). W porównaniu do drewna (VM = ok. 78−85% s.m. (Malico i in. 2019)) średnia VM pozostałości była znacznie niższa, nawet o ok. 20 pp., lecz niektóre biosurowce cechują się jeszcze niższą zawartość VM, np. łuski ryżowe (38,80% s.m.) (Malico i in. 2019).

Średnia FC wyniosła 14,02% s.m., a SD było równe 1,18% s.m. (tab. 25). Finola spośród wszystkich odmian cechowała się najniższą zawartością FC (12,52% s.m.; grupa „c”), a Santhica 70 najwyższą (15,68% s.m.; „a”). Zróżnicowanie wewnątrzgrupowe dla pojedynczej odmiany nie przekroczyło 1,00% s.m. Zbiór kwiatów, tak jak w przypadku pozostałych parametrów, nie był czynnikiem istotnie różnicującym analizowaną biomasę pod kątem FC (tab. 24).

Analizowane pozostałości cechowały się zbliżonymi FC względem czystego drewna (15,23% s.m.) (Stolarski i in. 2022), odpadowego drewno z zakładu przetwórczego (15,07% s.m.) (Bosch i in. 2022) czy obornika bydlęcego (14,7% s.m.) (Ghodake i in. 2021). FC jest kluczowa w składzie potencjalnego biopaliwa, ponieważ stanowi jedno z największych źródeł ciepła podczas spalania (zwiększa HHV) (Suárez-Rivero i in. 2021, Kebede i in. 2022). Ponadto jego większe udziały zwiększają ilości biowęgla wytwarzanego podczas pirolizy (Mari Selvam i Balasubramanian 2023).

Przedział A w zależności od odmiany odznaczył się granicami na poziomie 16,46−29,13% s.m. (tab. 25). Najniższą A posiadała Santhica 70 (16,46% s.m.), a najwyższą Finola (29,13% s.m.) i były to odmiany, które należały wyłącznie do skrajnych grup jednorodnych „a” i „c”. Ta rozpiętość wynosiła prawie 12,7 pp, tj. 77%. Najmniejszą i największą zmiennością również odznaczyły się te dwie odmiany (0,98% s.m. dla Santhica 70 vs. 4,95% s.m. dla Finola). Średnia A dla ogółu próbek była równa 21,15% s.m., a SD wynosiła 4,63% s.m.

Analizowana biomasa, niezależnie od odmiany, zaliczała się do biomasy o wysokiej A, tj. o udziale masowym >10% (biomasa o średniej zawartości popiołu zawiera go 5−10%, a o niskiej <5%) (Stella Mary i in. 2016). Równie wysokimi A jak przebadane pozostałości cechowały się inne surowce biomasowe, m.in. łuski ryżowe (16−23% s.m.), odpady z odziarniania bawełny (17,2% s.m.) (Munawar i in. 2021) czy poferment z biogazowni (15−48,9% s.m.) (Ogwang i in. 2021). Tak wysoka A może być przyczyną wielu problemów podczas termicznej konwersji: spiekanie, osadzanie się żużla lub aglomeracja (Puri i in. 2024). Z drugiej strony biomasa o takiej A może stanowić cenny dodatek buforujący (przeciwdziałający problemowi zakwaszenia i niestabilności procesu) w biogazowniach, zastępując komercyjne odczynniki alkaliczne. Może stanowić też uzupełnienie makro- i mikroelementów niezbędnych do aktywności beztlenowych mikroorganizmów w procesie fermentacji, co prowadzi do ogólnej poprawy procesu (Alavi-Borazjani i in. 2020). Jednakże decydujący w tym aspekcie jest również skład popiołu.

Czynnikiem, który wpływa na A często jest zanieczyszczenie biomasy (Cavalaglio i in. 2020). Najwyższymi A odznaczyły się Finola i Henola, czyli odmiany najniższe względem pozostałych, a cechujące się zarazem gęstym i „bujnym" kwiatostanem pokrywającym większość pędu. Bardzo prawdopodobne, że kwiatostany/owocostany tych odmian były w okresie rozwojowym bardziej podatne na zanieczyszczenia cząstkami gleby erodowanymi przez wiatr, co przełożyło się na najwyższe A spośród wszystkich stałych pozostałości po hydrodestylacji.

4.8.2. Skład elementarny

Dla wszystkich próbek średnia C wyniosła 36,99 % s.m., przy SD = 3,24% s.m. (tab. 26). To zdecydowanie mniej niż dla typowych surowców biomasowych jak słoma (45,93% s.m.); drewno (49,01% s.m.); kora (49,66% s.m.); topola z zagajników krótkiej rotacji (48,48% s.m.) czy miskant (47,97% s.m.) (Saleh i in. 2014). Co ciekawe, żadna odmiana nie osiągnęła średniej C na tym poziomie. Najwięcej zawierała pozostałość Białobrzeskie (41,35% s.m.), a najmniej odmiany Finola (31,90% s.m.) (grupy jednorodne „a" i „c" odpowiednio). Zmienność dla żadnej z odmian nie była większa niż 2,54% s.m., ani mniejsza niż 1,50% s.m.. Zbiór kwiatów nie był istotny statystycznie dla C oraz pozostałych parametrów z zakresu analizy elementarnej (tab. 26).

Tabela 26. Skład elementarny stałej pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	C (% s.m.)	H (% s.m.)	S (% s.m.)	N (% s.m.)	Cl (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	41,35 ± 1,50 a	4,07 ± 0,42 ab	0,140 ± 0,025 ab	3,19 ± 0,09 a	0,143 ± 0,026 ab
	Henola	36,50 ± 1,93 b	4,02 ± 0,27 ab	0,141 ± 0,009 a	3,29 ± 0,18 a	0,153 ± 0,043 a
	Santhica 27	37,99 ± 1,94 ab	4,30 ± 0,20 a	0,154 ± 0,048 a	3,23 ± 0,12 a	0,113 ± 0,032 ab
	Santhica 70	37,91 ± 1,55 ab	4,23 ± 0,24 a	0,135 ± 0,046 ab	3,35 ± 0,08 a	0,120 ± 0,015 ab
	Earlina 8fc	35,81 ± 1,54 b	4,06 ± 0,19 ab	0,081 ± 0,012 b	2,97 ± 0,09 b	0,143 ± 0,024 ab
	Kompolti	37,51 ± 2,53 b	4,18 ± 0,36 a	0,124 ± 0,033 ab	2,79 ± 0,13 b	0,093 ± 0,029 b
	Finola	31,90 ± 2,54 c	3,50 ± 0,33 b	0,104 ± 0,034 ab	3,36 ± 0,10 a	0,116 ± 0,035 ab
Zbiór kwiatów	ze zbiorem kwiatów	36,87 ± 3,52	4,03 ± 0,43	0,117 ± 0,040	3,19 ± 0,24	0,125 ± 0,037
	bez zbioru kwiatów	37,12 ± 3,01	4,07 ± 0,31	0,134 ± 0,036	3,15 ± 0,21	0,127 ± 0,032
Średnia		36,99 ± 3,24	4,05 ± 0,37	0,126 ± 0,038	3,17 ± 0,23	0,126 ± 0,034

* a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Teixeira i in. (2024) przeanalizowali biomasę drzewną 46 gatunków m.in. w aspekcie C. Najniższymi zawartościami cechowały się *Ginkgo biloba* (34,49% s.m.) i *Calocedrus decurrens* (36,88% s.m.), i były to już gatunki drzew o zawartościach C zbliżonych do przeanalizowanej pozostałości. Zbadana pozostałość może być zatem w pewnym stopniu, pod względem C, równo cennym surowcem w porównaniu do biomasy drzewnej niektórych gatunków. Szczególnie, jeżeli bierze się pod uwagę możliwość termicznego przekształcania. Krytycznym czynnikiem determinującym potencjał energetyczny biomasy jest właśnie C, przy czym wyższe jego udziały na ogół korelują z wyższymi HHV. Relatywnie niższa C wiąże się zazwyczaj z tym, że biomasa może dawać niższe wyniki energetyczne po spaleniu w porównaniu z gatunkami o wyższej C (Teixeira i in. 2024). Analogicznie, C decyduje o potencjale biomasy do produkcji biogazu (Thakur i in. 2022).

Pod względem zawartości H, S, N i Cl stała pozostałość była istotnie zróżnicowana, jednak dosyć słabo (tab. 26). W przypadku każdego z parametrów wyróżniono wyłącznie po dwie grupy jednorodne („a" i „b"), a dla H, S i Cl kilka odmian (od trzech do pięciu w zależności od parametru) znalazło się w obu grupach. Jedynie w przypadku N, każda z odmian została przyporządkowana albo do grupy jednorodnej „a" (o wyższej N), albo do grupy „b" (o niższej N).

Do wyłącznie grupy „a" − o najwyższej zawartości H zostały przyporządkowane Santhica 27 (4,30% s.m.), Santhica 70 (4,23% s.m.) i Kompolti (4,18% s.m.) (tab. 26). Wyłącznie do „b" została zakwalifikowana Finola (najniższa zawartość H, 3,50% s.m.). Pozostałe odmiany znalazły się w grupie „a" i „b". Ogólnie rzecz biorąc średnia H bez żadnego zróżnicowania była równa 4,5% s.m., a zmienność wyrażona SD 0,37% s.m.

Ta średnia H (4,05% s.m.) była niższa w porównaniu do drewna w postaci trocin (6,75% s.m.) czy zrzyn (6,53% s.m.) (Dudziec i in. 2023) jak i większości surowców biomasowych (paliwa komercyjne, odpady przemysłowe, odpady leśne, uprawy energetyczne i zboża); porównywalna jedynie do wybranych surowców, np. do sorgo (4,38% s.m.) (Gulec i in. 2022). Odzwierciedleniem wartości energetycznej jest zazwyczaj H (Tang i in. 2020). Tak też wyższe wartości HHV uzyskuje się, gdy w próbkach biomasy występuje wyższa H (Nivash i Sakthivadivel 2024).

Średnia S była równa 0,126% s.m., a SD 0,038% s.m. (tab. 26). Najniższą S odznaczyła Earlina 8fc (0,081% s.m.), która należała wyłącznie do grupy „b". Natomiast najwyższe S miały Henola (0,141% s.m.) i Santhica 27 (0,154% s.m.) zaliczone wyłącznie do „a". Różnica miedzy tymi skrajnymi odmianami wyniosła 74−90%. Zróżnicowanie wewnątrzgrupowe względem odmiany sięgnęło maksymalnie 0,048% s.m. (Santhica 27).

Stwierdzona dla pozostałości średnia S była wyższa niż w przypadku biomasy roślin o krótkiej rotacji zbioru (0,032% s.m.) (Stolarski i in. 2024b), gałęzi drzew leśnych (0,024% s.m.) (Stolarski i in. 2024c) czy słomy (0,088% s.m.) (Stolarski i in. 2024d); ale niższa w porównaniu do obornika (0,22 czy 0,45% s.m. w zależności od grupy hodowanych zwierząt) (Sitka i in. 2021, Gajera i in. 2024). Spalanie materiału zawierającego S uwalnia jego lotną zawartość, która następnie reaguje z H, tworząc siarkowodór, lub z tlenem, tworząc dwutlenek siarki. Niska S w tym biosurowcu powinna odzwierciedlać powstawanie niewielkich emisji tych gazów w wyniku spalania i mniejsze ryzyko korozji (związki S kondensują się na powierzchniach wymiennika kotła) (Lisy i in. 2020). Ponadto S może mieć wpływ na ilość oraz jakość biogazu. Chociaż siarka jest niezbędna do metabolizmu mikroorganizmów, jej wysoka zawartość może prowadzić do nadmiernego tworzenia siarkowodoru, który jest niepożądany (gaz trujący, żrący) (Sihlangu i in. 2024).

Średnia N była równa 3,17% s.m., a SD 0,23% s.m. (tab. 26). W grupie jednorodnej „a" znalazły się odmiany o najwyższych średnich N (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70 i Finola) mieszczących się w przedziale 3,19−3,36% s.m. Natomiast w „b" odmiany o zawartościach najniższych (Kompolti i Earlina 8fc, średnie N wynoszące odpowiednio 2,79 i 2,97% s.m.). Różnica między tymi grupami wyniosła zatem 7−20%.

Dla procesu spalania niższe N są pożądane, ponieważ powstaje wówczas mniejsze stężenie tlenków azotu (gazów uważanych za niebezpieczne i żrące; stanowią zanieczyszczenia powietrza) (Nivash i Sakthivadivel 2024). Z kolei przy poszukiwaniu optymalnego wsadu do biogazowni, stanowiącego kombinację różnych odpadów, biomasa o wyższych N może stanowić kluczowy element. Materiały organiczne o wysokiej N mają bowiem tendencję do stymulowania aktywności mikroorganizmów, co powoduje przyspieszony rozkład i zwiększoną produkcję biogazu. Niemniej jednak istotny jest tutaj skład całego wsadu, gdyż nadmierna N może prowadzić do problemów (toksyczność amoniaku, niestabilność procesu) (Sihlangu i in. 2024). Stwierdzona dla pozostałości średnia N była wyższa zarówno w porównaniu do obornika (1,6 czy 2,24% s.m. w zależności od grupy hodowanych zwierząt) (Sitka i in. 2021, Gajera i in. 2024), słomy (0,88% s.m.) (Stolarski i in. 2024d) oraz drewna (0,25% s.m.) (Stolarski i in. 2022).

Dla ogółu pozostałości średnia Cl wyniosła 0,126% s.m. przy SD równym 0,034% s.m. (tab. 26). Najniższa Cl była dla Kompolti (0,093% s.m.), a najwyższa dla Henola (0,153% s.m.). Odmiany te należały wyłącznie do grup „b" i „a", odpowiednio.

Wysoka Cl w biomasie ułatwia tworzenie związków metali alkalicznych o niskiej temperaturze topnienia podczas spalania, a także gazów korozyjnych, takich jak chlorowodór

i chlor cząsteczkowy. Ponadto zwiększa emisję tych zanieczyszczeń gazowych do atmosfery. Substancje te mogą powodować osadzanie się popiołu, żużlowanie i korozję na powierzchni wymiany ciepła kotłów, co z kolei prowadzi do zmniejszenia ich wydajności (Król i in. 2022, Tang i in. 2023). W aspekcie fermentacji beztlenowej (produkcji biogazu) Cl jest również ważna, ponieważ hamuje wzrost mikroorganizmów (Tamilselvan i Selwynraj 2024). Uzyskana Cl była znacznie wyższa w porównaniu do topoli z krótkiej rotacji zbioru (0,009% s.m.) (Stolarski i in. 2020) czy czystych odpadów drzewnych (0,056% s.m.) (Gehrmann i in. 2020). Natomiast była niższa w porównaniu do odchodów bydlęcych (0,54% s.m.) (Maj i in. 2021) czy słomy (0,174% s.m.) (Stolarski i in. 2024d).

4.8.3. Właściwości energetyczne

Średnie HHV, w zależności od odmiany, mieściło się w przedziale od 14,64 do 16,69 MJ kg^{-1} s.m., a zróżnicowanie wewnątrzgrupowe od 0,31 do 0,94 MJ kg^{-1} s.m. (tab. 27). Odmiana o najniższej średniej wartości HHV – Finola (grupa jednorodna „b") odznaczyła się jednocześnie największym rozrzutem tego parametru. Odmiany o najwyższym średnim HHV – Santhica 70 (16,69 MJ kg^{-1} s.m.), Santhica 27 (16,09 MJ kg^{-1} s.m.) i Earlina 8fc (16,06 MJ kg^{-1} s.m.) należały wyłącznie do „a". Średnie HHV dla pozostałości wyniosło 15,92 ± 0,89 MJ kg^{-1} s.m.

Tabela 27. Właściwości energetyczne pozostałości w zależności od odmiany i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	HHV (MJ kg^{-1} s.m.)	LHV (MJ kg^{-1}) przy 15% wilgotności
Odmiana	Białobrzeskie	16,66 ± 0,48 a	13,10 ± 0,43 a
	Henola	15,63 ± 0,90 ab	12,24 ± 0,74 ab
	Santhica 27	16,09 ± 0,56 a	12,58 ± 0,45 a
	Santhica 70	16,69 ± 0,31 a	13,10 ± 0,27 a
	Earlina 8fc	16,06 ± 0,63 a	12,60 ± 0,51 a
	Kompolti	15,68 ± 0,47 ab	12,25 ± 0,37 ab
	Finola	14,64 ± 0,94 b	11,48 ± 0,76 b
Zbiór kwiatów	ze zbiorem kwiatów	15,85 ± 1,04	12,42 ± 0,83
	bez zbioru kwiatów	15,99 ± 0,74	12,53 ± 0,60
Średnia		15,92 ± 0,89	12,48 ± 0,72

*a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

HHV to parametr ważny dla prawidłowego projektowania i późniejszego działania systemów energetycznych opartych na biomasie. Ten parametr reprezentuje maksymalną potencjalną energię, którą można odzyskać z biomasy (Ghiasi i in. 2024). Średnia HHV pozostałości była zbliżona do obornika bydlęcego (16,0 MJ kg^{-1} s.m.) (Marin-Batista i in. 2020) czy kolby kukurydzy (15,8 MJ kg^{-1} przy W = 9,0%) (Kazimierski i in. 2022).

Przyporządkowanie do grup jednorodnych względnych obliczonych LHV (przy 15% wilgotności) było identyczne jak w przypadku HHV (tab. 27). Najwyższą wartość posiadały Białobrzeskie i Santhica 70 (obie 13,10 MJ kg^{-1}); najniższą Finola (11,48 MJ kg^{-1}). Zróżnicowanie wewnątrzgrupowe znalazło się w przedziale od 0,27 MJ kg^{-1} (Santhica 70) do 0,76 MJ kg^{-1} (Finola). Średia LHV dla pozostałości wyniosła 12,48 MJ kg^{-1}, a SD 0,72 MJ kg^{-1}.

Otrzymane LHV obliczono dla stanu powietrzno-suchego (przy W = 15%), a zatem zależały wyłącznie od HHV i H. Średnia LHV była niższa w porównaniu do wierzby (15,95 MJ kg^{-1}), trocin (15,82 MJ kg^{-1}) (Chiang i in. 2012) czy pszenżyta (13,83 MJ kg^{-1}) (Heinz i in. 2001). Natomiast była zbliżona do zrębki z odpadów parkowych (12,61 MJ kg^{-1}) (Zhang i in. 2015).

4.8.4. Skład lignocelulozowy i zawartość ekstraktów

Cel jak i pozostałe parametry zostały istotnie zróżnicowane przez odmianę (tab. 24). Zbiór kwiatów był z kolei czynnikiem istotnie różnicującym jedynie CWE i HWE. Interakcje pomiędzy tymi dwoma czynnikami okazały się być nieistotne statystycznie w przypadku każdej przeanalizowanej cechy.

Pozostałość zawierała średnio 18,88% s.m. Cel, a SD było równe 1,97% s.m. (tab. 28). Najwyższą zawartością odznaczyła się Finola (20,70% s.m.), a najniższą Earlina8fc (16,82% s.m.). Te dwie odmiany wyraźnie odznaczyły się od pozostałych, przynależąc wyłącznie do skrajnych grup jednorodnych („a” i „c” odpowiednio).

Tabela 28. Zawartość celulozy, hemicelulozy, ligniny i substancji ekstrakcyjnych w pozostałości po hydrodestylacji w zależności od odmiany i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	Cel (% s.m.)	Hem (% s.m.)	Lig (% s.m.)	CWE (% s.m.)	HWE (% s.m.)	OSS (% s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	18,34 ± 2,08 abc	15,44 ± 0,81 c	8,46 ± 1,10 ab	23,08 ± 1,75 a	26,81 ± 1,57 a	30,93 ± 2,06 ab
	Henola	19,75 ± 1,90 ab	22,60 ± 1,94 ab	8,31 ± 0,67 ab	17,95 ± 0,80 bc	21,52 ± 0,53 b	27,81 ± 1,87 bc
	Santhica 27	19,27 ± 0,95 abc	15,88 ± 1,15 c	8,46 ± 0,51 ab	23,09 ± 1,21 a	26,55 ± 1,39 a	29,83 ± 1,48 ab
	Santhica 70	20,13 ± 1,03 a	16,09 ± 1,20 c	7,95 ± 1,31 abc	22,86 ± 1,45 a	26,58 ± 1,41 a	29,24 ± 0,98 abc
	Earlina 8fc	16,82 ± 1,35 c	19,10 ± 1,43 bc	8,82 ± 0,57 a	21,45 ± 1,23 a	25,53 ± 1,74 a	29,73 ± 1,86 ab
	Kompolti	17,17 ± 1,72 bc	18,83 ± 3,73 bc	7,04 ± 1,03 bc	20,79 ± 2,70 ab	25,19 ± 2,41 a	31,78 ± 2,65 a
	Finola	20,70 ± 1,14 a	25,80 ± 4,97 a	6,66 ± 0,56 c	17,27 ± 3,26 c	20,78 ± 3,14 b	26,05 ± 2,09 c
Zbiór kwiatów	Ze zbiorem kwiatów	18,81 ± 2,13	19,82 ± 5,44	8,13 ± 1,05	20,27 ± 3,44 b	23,99 ± 3,33 b	29,24 ± 3,04
	Bez zbioru kwiatów	18,96 ± 1,85	18,40 ± 2,88	7,79 ± 1,16	21,59 ± 2,15 a	25,43 ± 2,35 a	29,44 ± 1,94
Średnia		18,88 ± 1,97	19,11 ± 4,36	7,96 ± 1,10	20,93 ± 2,91	24,71 ± 2,94	29,34 ± 2,52

* a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Doniesiono, że Cel posiada stabilne HHV, niezależnie od gatunku, ponieważ wartości uzyskane przez kilku autorów dla różnych rodzajów celulozy są do siebie zbliżone, np. 17,22−17,56 MJ kg^{-1}, co mieści się w zakresie błędu i jest podobne do wartości 17,36 MJ kg^{-1} podanej dla skrobi (homopolimer D-glukozy tak samo jak celuloza). Cel jest więc pewnym wyznacznikiem HHV (Esteves i in. 2023). Ponadto wyższe Cel w biomasie wskazują, że jest ona nieco bardziej łatwopalna (Gani i in. 2024). Natomiast jeśli chodzi o produkcję biogazu, to wydajność metanu jest silnie skorelowana z jej zawartością (Mirmohamadsadeghi i in. 2021). Pozostałość cechowała się bardzo niską Cel w porównaniu do biomasy rolniczej (44,70% s.m.), biomasy drzewnej (44,04% s.m.) (Brandić i in. 2024) czy obornika od bydła mlecznego (31,71% s.m.) (Rehman i in. 2017). Jednakże posiadała większą zawartość tego komponentu w porównaniu do gnojowicy bydlęcej (14,6% s.m.) (Nielsen i in. 2020) jak i obornika kurzego (14,49% s.m.) (Rehman i in. 2017). Ta średnia zawartość mieściła się także w granicach zawartości wskazywanych dla pofermentu z biogazowni (9,9−23,9% s.m.; przedział nie uwzględnia ciekłej mieszaniny pofermentu) (Nielsen i in. 2020).

Pozostałość posiadała większą średnią zawartość Hem w porównaniu do Cel (19,11 > 18,88% s.m.) (tab. 28). Jednakże zróżnicowanie wewnętrzne było większe w przypadku hemicelulozy (4,36 > 1,97% s.m.) i niektóre odmiany (Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70) posiadały w swoim składzie więcej Cel niż Hem. Najwyższą średnią Hem odznaczyła się Finola (25,80% s.m.; grupa jednorodna „a"), a najniższą Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70 (15,44−16,09% s.m.; przynależność wyłącznie do „c"). Największym zróżnicowaniem wewnętrznym Hem odznaczyła się Finola (4,36% s.m.), a najmniejszym Białobrzeskie (0,81% s.m.). Biorąc pod uwagę oba parametry (Cel i Hem) sumaryczna średnia zawartość holocelulozy w analizowanym materiale była równa 37,99% s.m. (tab. 28).

Chociaż istnieją różne rodzaje hemiceluloz i hemiceluloza jest odmienna od celulozy, ich HHV nie różnią się znacząco ze względu na podobne struktury chemiczne. Niemniej jednak korelacje oparte wyłącznie na Hem mają bardzo słabą jakość (Domingos i in. 2020, Esteves i in. 2023). Jeśli chodzi o produkcję biogazu, to hemiceuloza jest rozkładana przez bakterie i podatna na fermentację beztlenową, silnie korelując z wydajnością metanu (Mirmohamadsadeghi i in. 2021). Ogólnie średnia Hem w pozostałości była niższa w porównaniu do biomasy drzewnej (27,25% s.m.), biomasy rolniczej (23,21% s.m.) (Brandić i in. 2024) czy obornika kurzego (21,66% s.m.) (Rehman i in. 2017), ale nie aż tak znacząco jak w przypadku przedyskutowanej wyżej Cel. Ponadto posiadała wyższą zawartość tego komponentu w porównaniu do gnojowicy bydlęcej (14,1% s.m.) (Nielsen i in. 2020) oraz obornika od bydła mlecznego (16,79% s.m.) (Rehman i in. 2017). Przewyższyła pod tym

względem również poferment z biogazowni (6−18,2% s.m.; przedział nie uwzględnia ciekłej mieszaniny pofermentu) (Nielsen i in. 2020).

Średnia Lig była równa 7,96 ± 1,10% s.m. (tab. 28). Jeśli chodzi o zróżnicowanie odmian to było ono najmniejsze spośród wszystkich składników lignocelulozy – pięć odmian znalazło się w co najmniej dwóch grupach jednorodnych. Odstawały jedynie Earlina 8fc o najwyższej zawartości (8,82% s.m.; grupę jednorodną „a") oraz Finola o najniższej zawartości (6,66% s.m.; grupa „c").

Lignina ma kilka różnych struktur chemicznych (zależność m.in. od rodzaju biomasy), przez co indywidualnie stanowi słaby parametr do predykcji wartości energetycznej (Esteves i in. 2023). Sam wzrost udziału ligniny w strukturze chemicznej biomasy powoduje podwyższenie HHV, ponieważ posiada ona znacząco wyższe HHV w porównaniu do celulozy czy hemicelulozy (Domingos i in. 2020). Dodatkowo, jeśli Lig jest wyższa niż Cel, to biomasa pali się nieco dłużej (Gani i in. 2024). W produkcji biogazu obecność ligniny zmniejsza porowatość biomasy, co utrudnia bakteriom rozkład celulozy i hemicelulozy. W efekcie surowiec lignocelulozowy przetworzony bezpośrednio na biogaz cechuje się mniejszą wydajnością (Sumardiono i in. 2022). Uzyskana dla pozostałości średnia Lig była niższa w porównaniu do gnojowicy bydlęcej (9,9% s.m.) (Nielsen i in. 2020), obornika od bydła mlecznego (13,58% s.m.) (Rehman i in. 2017), biomasy rolniczej (15,08% s.m.) (Brandić i in. 2024), pofermentu z biogazowni (15,7−21,1% s.m.; przedział nie uwzględnia ciekłego pofermentu z biogazowni) (Nielsen i in. 2020) i biomasy drzewnej (27,64% s.m.) (Brandić i in. 2024). Natomiast była wyższa w porównaniu do obornika kurzego (7,83% s.m.) (Rehman i in. 2017) czy słomy pszennej (6,3% s.m.) (Nielsen i in. 2020).

Sumaryczna średnia zawartość lignocelulozy wyniosła 45,96% s.m. To niewiele, jeżeli przyjąć, że w materiale lignocelulozowym celuloza, hemiceluloza i lignina stanowią zazwyczaj ponad 80% (Mirmohamadsadeghi i in. 2021).

W zakresie ekstraktów największą zawartością CWE odznaczyły się Santhica 27, Białobrzeskie, Santhica 70 i Earlina 8fc (średnie przedziale 21,45−23,08% s.m.) należące do grupy jednorodnej „a" (tab. 28). Najniższą zawartość posiadała Finola (17,27% s.m.) należąca do „c". Odmiany pod względem HWE rozdzieliły się z kolei na dwie grupy j. Pierwsza „a" o najwyższych zawartościach mieszczących się w przedziale 25,19−26,81% s.m., do której zaliczone zostały Kompolti, Earlina 8fc, Santhica 27, Santhica 70 i Białobrzeskie. Natomiast „b" o zawartościach najniższych, w której znalazły się Finola i Henola (kolejno 20,78 i 21,52% s.m.). Co warte zaznaczenia odnośnie CWE i HWE istotnym czynnikiem różnicującym ich zawartości okazał się zbiór kwiatów. Spośród wszystkich przeanalizowanych 17 cech

ilościowo-jakościowych tylko w tych dwóch przypadkach zbiór kwiatów był czynnikiem mającym nieprzypadkowy wpływ na zróżnicowanie próbek względem siebie. Wyższą średnią zawartością odznaczyły się próbki bez zbioru kwiatów: 21,59 > 20,27% s.m. w przedmiocie CWE; oraz 25,43 > 23,99% s.m. w przedmiocie HWE. Usuwanie kwiatów prowadzi do obniżenia zawartości substancji ekstrakcyjnych, ponieważ wiecha konopi zlokalizowana w górnej części pędu jest bogata w związki biologicznie czynne (Dudziec i in., 2024). Może to obniżać HHV pozostałości oraz wpływać na aktywność mikrobiologiczną podczas produkcji biogazu (Demirbas 2002; Domingos i in. 2020; Pisano i in. 2021; Tajmirriahi i in. 2021). W aspekcie OSS zróżnicowanie poszczególnych odmian było najmniejsze. Jedynie dwie skrajne zawartości odpowiadające Kompolti i Finola należały wyłącznie do jednej grupy jednorodnej, odpowiednio „a" (31,78% s.m.) i „c" (26,05% s.m.).

Ogólnie rzecz biorąc, bez zróżnicowania na odmianę i zbiór, profil stałej pozostałości po hydrodestylacji pod względem ekstraktów był następujący: CWE = 20,93 ± 2,91% s.m.; HWE = 24,71 ± 2,94% s.m.; i OSS = 29,34 ± 2,52% s.m. Łączna średnia zawartość ekstraktów wyniosła zatem 54,05% s.m.

Ekstrakty to niestrukturalne składniki biomasy, które są na ogół minerałami i metabolitami wtórnymi, dlatego też uważane za bogate źródło substancji bioaktywnych (Pisano i in. 2021). Do grupy ekstraktów zalicza się cukry proste, pektyny, skrobię, gumy, kwasy tłuszczowe, tłuszcze, woski, białka, sterole, żywice, terpeny, fenole i flawonoidy. Ekstrakty zazwyczaj stanowią ok. 10% s.m., przy czym ich zawartość znacznie różni się między gatunkami (od 2,66 do 30,47% s.m.) (Pisano i in. 2021, Tajmirriahi i in. 2021).

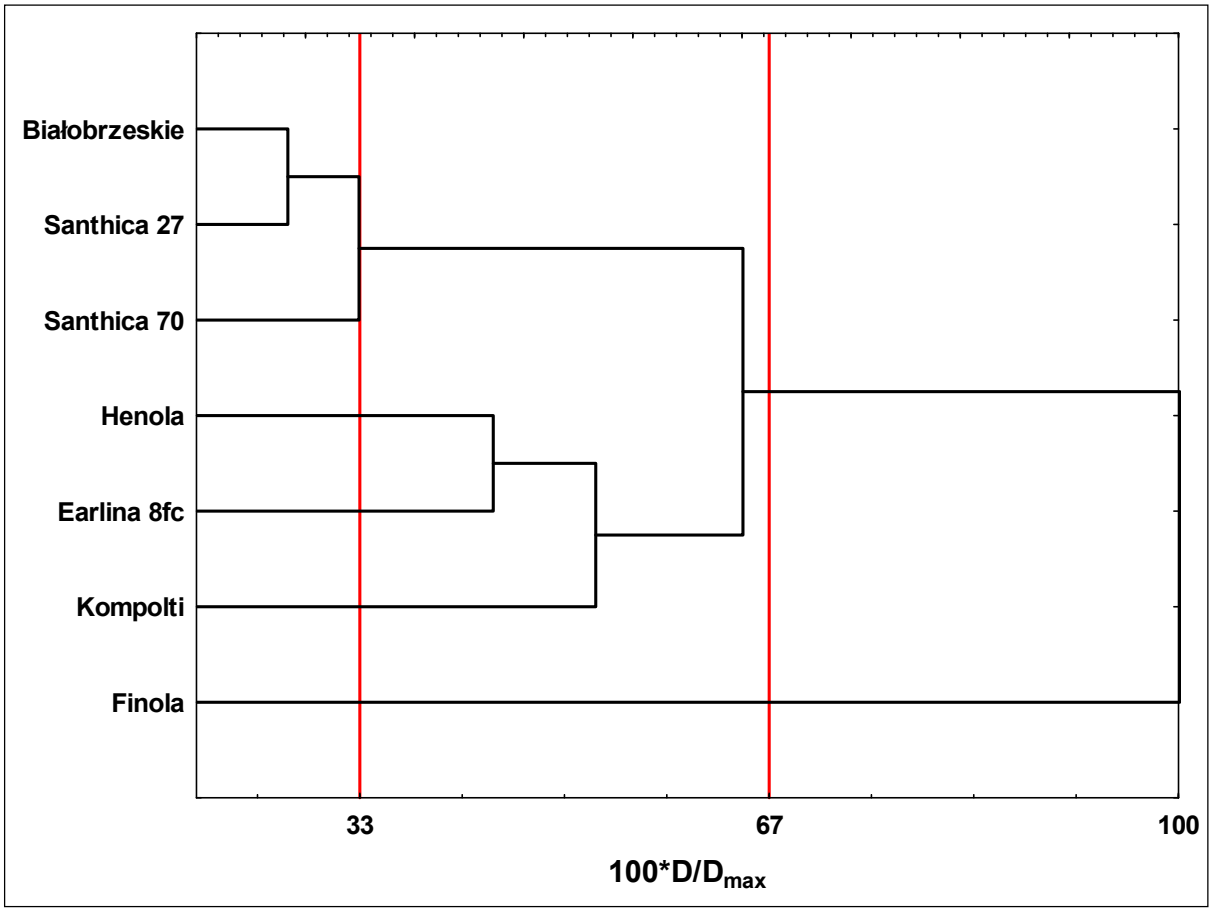
Pozostałość cechowała się bardzo wysoką średnią sumaryczną zawartością równą 54,05% s.m., co wskazuje na potrzebę bardziej szczegółowej analizy składu. Do tej pory w zakresie stałych odpadów z destylacji konopi zbadano m.in. skład fitochemiczny/ekstraktów zużytych kwiatów (Luca i in. 2021). Natomiast nie badano stałej pozostałości z hydrodestylacji biokoncentratu/pozostałości po omłocie. Sama średnia CWE była równa 20,93% s.m. i była to zawartość przewyższająca CWE w korze brzozy (14,39% s.m.), listowiu brzozy (17,3% s.m.), prosie rózgowatym (18,26% s.m.) czy korze topoli (18,45% s.m.) (Pisano i in. 2021).

Ekstrakty, pomimo często niewielkiej zawartości w biomasie, mogą wpływać na procesy biokonwersji w różny sposób, co wynika z ich zróżnicowanego składu (Tajmirriahi i in. 2021). Nie udało się osiągnąć jednoznacznych trendów co do korelacji zawartości ekstraktów z wartością energetyczną, aczkolwiek wskazuje się, że ekstrakty organiczne podnoszą HHV (Demirbas 2002, Domingos i in. 2020, Pisano i in. 2021). Natomiast ich zawartość znacząco wpływa na produkcję biogazu w kierunku zwiększenia bądź

zmniejszenia jego wydajności (np. niektóre związki mogą hamować rozkład beztlenowy) (Tajmirriahi i in. 2021). Biorąc pod uwagę, że niektóre ekstrakty mogą powodować utrudnienia w procesie biokonwersji, podczas stosowania surowca o wysokiej zawartości „niekorzystnych" ekstraktów przygotowanie biosurowca powinno skupić się również na ich wyizolowaniu. Wyizolowane ekstrakty mogą posiadać wysokie znaczenie w innych gałęziach przemysłu (Pisano i in. 2021).

4.8.5. Profile odmian

Rys. 14 przedstawia dendrogram podobieństw między odmianami pod względem ich parametrów jako biosurowca. Pozostałości sklasyfikowano jedynie do dwóch różnych klastrów przy punkcie odcięcia 0,66 D_{max}. Pierwszy klaster obejmował wyłącznie Finolę, a drugi pozostałe sześć odmian. Jednak tylko trzy odmiany (Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70) zostały sklasyfikowane do jednego wspólnego klastra przy punkcie odcięcia 0,33 D_{max}. Pozostałości tych odmian były najbardziej podobne do siebie pod względem jakości na tym poziomie odcięcia. Każda z pozostałych czterech odmian tworzyła odrębny klaster przy tym punkcie. Finola wyraźnie różniła się od pozostałych, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach analizy, ponieważ dominowała pod względem skrajnych poziomów poszczególnych parametrów. Obecność Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70 przy punkcie odcięcia 0,33 D_{max} nie jest zaskakująca, jeśli uwzględni się cechy tych odmian. Są to odmiany jednopienne o podobnych cechach biometrycznych, fenologii i przeznaczeniu użytkowym. Drugi klaster obejmował pozostałości Henola i Earlina 8fc (punkt odcięcia przy odległości wiązania około 0,4 D_{max}) – odmiany o podobnym profilu (jednopienne, przeznaczone do użytkowania na kwiaty i/lub nasiona, różniące się cechami biometrycznymi i fenologią, ale w niewielkim stopniu). Można jednak zastanawiać się nad podobieństwem pozostałości odmiany Kompolti (odmiana dwupienna, przeznaczona do produkcji biomasy i włókna, wyraźnie odmienna od pozostałych) do klastra obejmującego Henolę i Earlinę 8fc. Interesujący jest również brak podobieństwa odmiany Finola do grupy obejmującej Henolę i Earlinę 8fc (odmiana Finola jest także przeznaczona do użytkowania na kwiaty i nasiona, ma też zbliżoną do nich biometrię i fenologię).



Rysunek 14. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa stałych pozostałości po hydrodestylacji. Pionowa czerwona linia oznacza kryterium Sneatha – 0,66 D_{max} i 0,33 D_{max}. D – odległość wiązania; D_{max} – maksymalna odległość wiązania.

4.8.6. Potencjalne procesy konwersji oraz strategie wstępnej obróbki

Biomasa o W poniżej 50% jest efektywnie wykorzystywana do spalania, natomiast biomasa o W 5–20% jest zwykle stosowana jako paliwo. Zawartość W w drewnie wykorzystywanym w małych systemach grzewczych (np. w domach prywatnych) nie powinna przekraczać 25%. Jeżeli jest wyższa, temperatura spalania obniży się poniżej zakresu optymalnego, co prowadzi do zwiększenia strat ciepła, nasilenia emisji oraz możliwego uszkodzenia komina (Stolarski i in. 2022). Wysoka A może obniżać efektywność spalania i nasilać problemy korozyjne, dlatego biomasa o niskiej A jest wysoce pożądana (Racero-Galaraga i in. 2024). Biomasa, która posiada A powyżej 10% cechuje się jej wysoką zawartością (Stella Mary i in. 2016). Biomasa o wysokiej A powoduje również erozję i odkładanie żużla w reaktorze pirolitycznym, dlatego nie nadaje się do wykorzystania

w procesie pirolizy (Khuenkaeo i Tippayawong 2020). Ponadto biomasa o niższej W (poniżej 11%) jest najbardziej odpowiednim surowcem do produkcji biowęgla (Sahoo i in. 2021).

Stała pozostałość po hydrodestylacji konopi włóknistych charakteryzowała się wysoką średnią A wynoszącą 21,15 ± 4,63% s.m. oraz średnią wilgotnością 87,27 ± 1,10% (tab. 25), co nie predysponuje jej do bezpośredniego i/lub nieprzetworzonego wykorzystania jako biosurowca do spalania i produkcji biowęgla.

W obszarze procesów biochemicznych kompostowanie jest zazwyczaj stosowane w celu wzbogacania gleby z wykorzystaniem bogatych w składniki pokarmowe odpadów organicznych (Wang i Tester 2023). Najkorzystniejsza W dla biodegradacji różnych mieszanin kompostowych mieści się w zakresie od 50% do 70%. Prawidłowego kompostowania można także oczekiwać, gdy stosunek C/N jest niższy niż 25 (Li i in. 2013). W przypadku produkcji biogazu biomasa również powinna mieć wysoką wartość odżywczą, prowadzącą do zwiększenia wydajności biogazu (np. optymalny stosunek C/N = 25:1; wyższe wartości C/N są związane z niższymi stężeniami metanu).

Średni stosunek C/N (analiza tab. 26) w a pozostałości wynosił około 12, co jest wartością niską. Chociaż W przekraczała poziomy optymalne dla kompostowania, odpowiadała typowemu zakresowi dla surowców stosowanych w biogazowniach (Kasinath i in. 2021). Średnia A mieściła się w zakresie A w odpadach przeznaczonych do kompostowania i produkcji biogazu (Rahman i in. 2020; Steffen i in. 2016). Jednak zastosowanie kompostu wymaga także znajomości składu mineralogicznego popiołu. Główne składniki popiotwórcze obejmują pierwiastki takie jak Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe, Mn, a także metale ciężkie – Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V lub Hg (Racero-Galaraga i in. 2024). Chodzi o to, aby zapobiec wzrostowi zawartości metali ciężkich w glebie powyżej poziomów normatywnych. Ponadto skład i zawartość pierwiastków wpływają na aktywność mikrobiologiczną (Kasinath i in. 2021).

Charakterystyka stałej pozostałości po hydrodestylacji nie pozwala obecnie na wskazanie najbardziej odpowiedniego potencjalnego procesu konwersji. Profil chemiczny tej pozostałości sugeruje, że powinna ona zostać poddana obróbce wstępnej ukierunkowanej na obniżenie W, poprawę stosunku C/N oraz zmniejszenie A. Może to obejmować odwadnianie (np. mechaniczne), suszenie (np. gorącym powietrzem) oraz mieszanie z innymi rodzajami biomasy w odpowiednio dobranym stosunku masowym.

Niemniej jednak nawet w obecnej postaci biomasa ta mogłaby być wykorzystywana do współspalania, współpirolizy, współkompostowania lub współfermentacji. Szczególnie interesujące, ze względu na znaczną A, jest potencjalne wykorzystanie stałej pozostałości

po hydrodestylacji jako dodatku mineralnego do mieszanin kompostowych (co może poprawić strukturę i skład mineralny końcowego kompostu) lub jako składnika wsadu do biogazowni (w celu buforowania pH i potencjalnego zwiększenia aktywności mikrobiologicznej). Wymaga to jednak wyraźnie dalszych badań, zwłaszcza dotyczących składu popiołu.

Ponadto wysoka zawartość substancji ekstrakcyjnych (54,05% s.m., podrozdział 4.8.4.) rodzi pytanie, czy wskazane byłoby ekstrahowanie z biomasy związków biologicznie czynnych przed konwersją termochemiczną lub biochemiczną. Dlatego badanie składu substancji ekstrakcyjnych stałej pozostałości po hydrodestylacji stanowi istotny kierunek dalszych badań. Jest to szczególnie ważne, ponieważ substancje ekstrakcyjne mogą również zawierać związki chemiczne hamujące proces fermentacji/kompostowania, np. różne związki fenolowe wykazują zróżnicowany stopień hamowania produkcji biogazu (Tajmirriahi i in., 2021). Z drugiej strony wysoka zawartość ekstraktów może zwiększać HHV istotne w procesie spalania (Demirbas 2002; Domingos i in. 2020; Pisano i in. 2021). Wysoka zawartość substancji ekstrakcyjnych stanowi zatem zarówno szansę, jak i wyzwanie dla zastosowań bioenergetycznych, podkreślając potrzebę znalezienia odpowiedniej równowagi między waloryzacją a efektywnością procesu.

Ważne jest również podkreślenie ograniczeń logistycznych. Podczas gdy spalanie i kompostowanie są szeroko dostępne, technologie takie jak piroliza i produkcja biogazu są nadal ograniczone pod względem powszechnej dostępności.

4.9. Efektywność energetyczna produkcji łodyg i biomasy wegetatywnej

4.9.1. Plon oraz jego wartość energetyczna

W tych badaniach przedstawiono plon świeżej biomasy, który to był fizycznie zbierany i bezpośrednio wpływał na wielkość nakładów energetycznych związanych z jego pozyskaniem. Plon świeżej biomasy samych łodyg konopi włóknistych był istotnie różnicowany przez odmianę ($p < 0{,}001$) i przez interakcję odmiany z rokiem ($p < 0{,}001$). Natomiast plon całej biomasy wegetatywnej (bez nasion) był istotnie różnicowany również przez odmianę ($p < 0{,}001$) i rok ($p = 0{,}010$) oraz interakcję tych dwóch czynników (tab. 29). Z kolei obliczony plon suchej masy zarówno samych łodyg jak również całej biomasy wegetatywnej były istotnie różnicowane przez odmianę, rok i interakcję tych dwóch czynników ($p < 0{,}001$).

Tabela 29. Analiza wariancji (wartości *p*) dla analizowanych cech związanych z efektywnością energetyczną produkcji łodyg i biomasy wegetatywnej konopi włóknistych.

Parametr	Odmiana (C)	Rok(Y)	Zbiór kwiatów (F)	C × Y	C × F	Y × F	C × Y × F
Plon łodyg (Mg ha^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,260	0,096	<0,001*	0,608	0,615	0,870
Plon biomasy wegetatywnej (Mg ha^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,010*	0,085	<0,001*	0,491	0,267	0,886
Plon łodyg (Mg ha^{-1} s.m.)	<0,001*	<0,001*	0,425	<0,001*	0,491	0,561	0,844
Plon biomasy wegetatywnej (Mg ha^{-1} s.m.)	<0,001*	<0,001*	0,510	<0,001*	0,519	0,409	0,888
Wartość energetyczna łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	<0,001*	0,737	<0,001*	0,453	0,570	0,822
Wartość energetyczna biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	<0,001*	0,966	<0,001*	0,237	0,205	0,685
Nakłady materiałowe (GJ ha^{-1})	<0,001*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Nakłady pracy ludzkiej dla łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,260	0,096	<0,001*	0,608	0,615	0,870
Nakłady pracy ludzkiej dla biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,010*	0,085	<0,001*	0,491	0,267	0,886
Nakłady energii związane z wykorzystaniem ciągników i maszyn dla łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,260	0,096	<0,001*	0,608	0,615	0,870
Nakłady energii związane z wykorzystaniem ciągników i maszyn dla biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,010*	0,085	<0,001*	0,491	0,267	0,886
Nakłady energii związane ze zużyciem paliwa dla łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,260	0,096	<0,001*	0,608	0,615	0,870
Nakłady energii związane ze zużyciem paliwa dla biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,010*	0,085	<0,001*	0,491	0,267	0,886
Całkowite nakłady energii dla łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,260	0,096	<0,001*	0,608	0,615	0,870
Całkowite nakłady energii dla biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	0,010*	0,085	<0,001*	0,491	0,267	0,886
Uzysk energii z produkcji łodyg (GJ ha^{-1})	<0,001*	<0,001*	0,763	<0,001*	0,449	0,569	0,819
Uzysk energii z produkcji biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})	<0,001*	<0,001*	0,934	<0,001*	0,233	0,205	0,678
Energochłonność produkcji łodyg (GJ Mg^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,115	0,094	<0,001*	0,035*	0,492	0,113
Energochłonność produkcji biomasy wegetatywnej (GJ Mg^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,319	0,168	<0,001*	0,438	0,499	0,769
Energochłonność produkcji łodyg (GJ Mg^{-1} s.m.)	<0,001*	0,040*	0,453	<0,001*	0,111	0,470	0,256

Energochłonność produkcji biomasy wegetatywnej (GJ Mg^{-1} s.m.)	<0,001*	<0,001*	0,882	<0,001*	0,320	0,733	0,920
Zużycie oleju napędowego dla łodyg (kg Mg^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,114	0,094	<0,001*	0,035*	0,491	0,113
Zużycie oleju napędowego dla biomasy wegetatywnej (kg Mg^{-1} ś.m.)	<0,001*	0,322	0,168	<0,001*	0,439	0,500	0,769
Zużycie oleju napędowego dla łodyg (kg Mg^{-1} s.m.)	<0,001*	0,006*	0,581	<0,001*	0,112	0,447	0,247
Zużycie oleju napędowego dla biomasy wegetatywnej (kg Mg^{-1} s.m.)	<0,001*	<0,001*	0,858	<0,001*	0,285	0,822	0,926
Wskaźnik efektywności energetycznej (produkcja łodyg)	<0,001*	<0,001*	0,930	<0,001*	0,310	0,542	0,729
Wskaźnik efektywności energetycznej (produkcja biomasy wegetatywnej)	<0,001*	<0,001*	0,715	<0,001*	0,201	0,196	0,650

*wartości istotne statystycznie ($p < 0,05$); nakłady materiałowe były takie same w produkcji łodyg i biomasy wegetatywnej.

Najwyższy świeży plon łodyg uzyskano dla Kompolti (26,75 Mg ha^{-1} ś.m.), która znalazła się wyłącznie w grupie jendorodnej „a” (tab. 30). Również plon biomasy wegetatywnej (bez nasion) był najwyższy dla tej odmiany (29,29 Mg ha^{-1} ś.m.); i także znalazła się ona wyłącznie w grupie „a”. Najniższy świeży plon łodyg odnotowano z kolei w trzech odmianach, które można określić jako kwietno-nasienne (odmiany niskie, „karłowate” wytwarzające dużo kwiatów i nasion; o krótkim cyklu rozwojowym): Earlina 8fc, Henola oraz Finola (10,44; 9,98; 5,26 Mg ha^{-1} ś.m., odpowiednio; wszystkie wyłącznie w „c”). Natomiast najniższy plon biomasy wegetatywnej był dla Finola (7,38 Mg ha^{-1} ś.m., wyłącznie „d”). Henola znalazła się zarówno w „c” jak i „d” (12,39 Mg ha^{-1} ś.m.), a Earlina 8fc wyłącznie w „c” (13,96 Mg ha^{-1} ś.m.). Ogólnie rzecz biorąc, na świeży łodyg plon wpływ miała tylko odmiana oraz jego interakcja z rokiem/sezonem wegetacyjnym. Z kolei świeży plon biomasy wegetatywnej był dodatkowo różnicowany przez rok (tab. 29).

Średni plon suchej biomasy łodyg z całego eksperymentu wyniósł 6,54 Mg ha^{-1}, a plon całej biomasy wegetatywnej (bez nasion) był średnio o 12% wyższy (tab. 30). Spośród odmian najwyższy plon łodyg stwierdzono w przypadku Kompolti (średnio 9,56 Mg ha^{-1}, grupa „a”). W pośredniej grupie „ab” znalazły się odmiany Białobrzeskie i Santhica 70, u których plon suchej masy łodyg wynosił również ponad 9 Mg ha^{-1}. Natomiast zdecydowanie istotnie najniższy plon suchej masy łodyg (średnio 1,96 Mg ha^{-1}, grupa „d”) stwierdzono dla Finola. Również plon całej biomasy wegetatywnej był najwyższy w przypadku Kompolti (średnio 10,49 Mg ha^{-1}, grupa „a”), ale w tej samej grupie znalazły się Białobrzeskie i Santhica 70. Natomiast najniższą wartość tego wskaźnika stwierdzono również w przypadku Finola. W 2024 r. plon suchej masy łodyg (średnio 7,39 Mg ha^{-1}) jak również całej biomasy wegetatywnej (średnio 8,55 Mg ha^{-1}) był wyższy o odpowiednio 30% i 36% w porównaniu do 2025 r.

Tabela 30. Plony oraz wartość energetyczna łodyg i biomasy wegetatywnej konopi włóknistych w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	Świeży plon łodyg (Mg ha^{-1} ś.m.)	Świeży plon biomasy wegetatywnej* (Mg ha^{-1} ś.m.)	Plon łodyg (Mg ha^{-1} d.m.)	Plon biomasy wegetatywnej* (Mg ha^{-1} d.m.)	Wartość energetyczna łodyg (GJ ha^{-1})	Wartość energetyczna biomasy wegetatywnej* (GJ ha^{-1})
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	23,57 ± 4,78 ab	26,85 ± 5,27 ab	9,41 ± 2,24 ab	10,31 ± 2,55 a	131,93 ± 33,92 a	151,36 ± 41,77 a
	Henola (H)	9,98 ± 4,80 c	12,39 ± 4,37 cd	3,81 ± 1,50 cd	4,87 ± 1,42 bc	52,01 ± 19,54 de	66,29 ± 18,37 de
	Santhica 27 (S27)	20,12 ± 5,61 b	22,57 ± 5,28 b	7,25 ± 1,97 b	8,05 ± 2,02 a	98,33 ± 28,08 bc	110,61 ± 27,52 bc
	Santhica 70 (S70)	25,35 ± 6,49 ab	26,97 ± 6,98 ab	9,12 ± 2,41 ab	9,97 ± 2,71 a	122,86 ± 33,99 ab	130,90 ± 37,27 ab
	Earlina 8fc (E)	10,44 ± 3,13 c	13,96 ± 3,12 c	4,70 ± 1,07 c	5,56 ± 1,45 b	68,88 ± 18,91 cd	96,88 ± 38,48 cd
	Kompolti (K)	26,75 ± 11,37 a	29,29 ± 12,33 a	9,56 ± 4,27 a	10,49 ± 4,68 a	126,47 ± 58,56 ab	141,40 ± 69,65 ab
	Finola (F)	5,26 ± 1,18 c	7,38 ± 1,99 d	1,96 ± 0,57 d	2,64 ± 0,92 c	27,21 ± 8,63 e	38,49 ± 14,63 e
Rok (Y)	2024 (24)	18,00 ± 12,15	21,39 ± 12,14 a	7,39 ± 4,34 a	8,55 ± 4,46 a	104,75 ± 58,46 a	127,65 ± 60,72 a
	2025 (25)	16,71 ± 7,22	18,45 ± 7,43 b	5,70 ± 2,46 b	6,28 ± 2,51 b	74,59 ± 32,13 b	82,62 ± 33,76 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem (FH)	18,32 ± 10,35	20,88 ± 10,39	6,70 ± 3,62	7,56 ± 3,81	90,57 ± 48,68	105,01 ± 51,52
	bez zbioru (NFH)	16,39 ± 9,57	18,95 ± 9,86	6,39 ± 3,63	7,27 ± 3,78	88,77 ± 50,44	105,25 ± 56,67
Średnia		17,35 ± 9,95	19,92 ± 10,11	6,54 ± 3,61	7,41 ± 3,78	89,67 ± 49,27	105,13 ± 53,83

*cała biomasa wegetatywna bez nasion

a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Uzyskany najwyższy średni suchy plon biomasy wegetatywnej (10,49 i 10,31 Mg ha^{-1}, odpowiednio dla Kompolti i Białobrzeskie) był niższy w porównaniu do średniego suchego plonu odmiany Futura 75 uprawianej w Szwecji (15,6 Mg ha^{-1}, zbiór we wrześniu i w październiku) (Kreuger i in. 2011a). Wynikać to może z innej odmiany czy stanowiska glebowego (średnio próchniczna gleba piaszczysta w Szwecji oraz gleba płowa o składzie granulometrycznym odpowiadającym piaskowi gliniastemu lekkiemu pylastemu w Polsce). Z kolei w badaniach Giannoulis i in. (2024) suchy plon biomasy Felina 32 wyniósł ok. 11 Mg ha^{-1} (podczas ostatniego terminu pobierania prób kiedy rośliny znajdowały się w fazie rozwojowej odpowiadającej dojrzałości do zbioru), co stanowiło już wartości porównywalne z ww. dwiema odmianami. Warto zaznaczyć, że w przywołanym badaniu przeprowadzonym w Grecji (inna szerokość geograficzna) zastosowano wyższe nawożenie azotowe (140 kg ha^{-1}), a także nawadnianie wynoszące 33% ewapotranspiracji referencyjnej. W Chinach plon zebranych pędów zawierał się w przedziale 5,2–16,5 Mg ha^{-1} (Tang i in. 2022). Plon łodyg nie wszystkich odmian z niniejszego eksperymentu znalazł się w tym przedziale. Earlina 8fc, Henola i Finola osiągnęły 4,70, 3,81 i 1,96 Mg ha^{-1} s.m., odpowiednio (tab. 30). Na stanowiskach korzystnych dla uprawy konopie włókniste osiągają plon łodyg rzędu 10 Mg ha^{-1} s.m. (Reinhardt i in. 2021) i w niniejszym eksperymencie żadna odmiana nie osiągnęła takiego plonu (tab. 30), co nie było zaskakujące ze względu na fakt słabego stanowiska glebowego (niskie pH; mała zawartość węgla organicznego; dominacja piasku w składzie granulometrycznym gleby). Najbliżej osiągnięcia progu była Kompolti (9,56 Mg ha^{-1} s.m.).

Wartość energetyczna plonu samych łodyg jak również całej biomasy wegetatywnej (wyliczona na podstawie plonu świeżej masy i LHV) była istotnie różnicowana przez odmianę i rok oraz interakcję tych dwóch czynników ($p < 0{,}001$) (tab. 29). Średnia wartość energetyczna plon suchego łodyg wynosiła 89,67 GJ ha^{-1}, a wartość tego wskaźnika dla całej biomasy była o średnio 15% wyższa (tab. 30). Najwyższą wartość energetyczną plonu samych łodyg stwierdzono w przypadku odmiany Białobrzeskie (średnio 131,93 GJ ha^{-1}, grupa „a"). W pośredniej grupie „ab" znalazły się Kompolti i Santhica 70, u których wartość tego wskaźnika była niższa o odpowiednio 4% i 7%. W przypadku pozostałych odmian wartość energetyczna plonu była niższa w zakresie od 25% do aż 79% odpowiednio dla Santhica 27 i Finola, w porównaniu do Białobrzeskie. W związku z powyższym kolejność badanych odmian pod względem wartości energetycznej samych łodyg przedstawiała się następująco: B>K>S70>S27>E>H>F. Podobną zależność w kolejności badanych odmian stwierdzono w przypadku wartości energetycznej całej biomasy wegetatywnej, ponieważ najwyższą wartość uzyskano w przypadku Białobrzeskie (średnio 151,36 GJ ha^{-1}). Natomiast różnice procentowe

pomiędzy odmianami były nieco inne, ponieważ wartość energetyczna całej biomasy Kompolti była niższa o 7%, a odmiany Finola o 75% w porównaniu do Białobrzeskie. Wartość energetyczna łodyg (średnio 104,75 GJ ha^{-1}) jak również całej biomasy wegetatywnej (127,65 GJ ha^{-1}) w 2024 roku była wyższa o odpowiednio 40% i 55% w porównaniu do 2025, co wynikało z korzystniejszych warunków meteorologicznych (rozkładu opadów i temperatur w 2024 roku).

W badaniach Prade i in. (2011) uzyskano wartość energetyczną biomasy w analogicznym okresie zbioru (wrzesień−listopad) wynoszącą ok. 200 GJ ha^{-1} dla odmiany Futura 75. Jest to ok. 49 GJ ha^{-1} więcej w porównaniu do najwyższej średniej wartości energetycznej uzyskanej w eksperymencie dla Białobrzeskie (tab. 30). Może to wynikać m.in. z niższej zawartości materii organicznej w glebie (1,4 vs 2,7%), niższego nawożenia azotem (120 vs. nawet 200 kg ha^{-1}) czy z niższej normy wysiewu (15 vs. 20 kg ha^{-1}). Z drugiej strony należy też podkreślić, ze w naszym eksperymencie plon biomasy wegetatywnej nie obejmuje nasion, a w badaniu Prade i in. (2011) plon biomasy zapewne je uwzględniał (nie podano tego wprost w zacytowanym badaniu).

Jednocześnie Prade i in. (2011) wskazał, że dla konopi zbieranych jesienią zakres wynosi 135–170 GJ ha^{-1}, w związku z czym jedynie Białobrzeskie i Kompolti zmieściły się w tym przedziale (tab. 30), przy czym pierwsza to odmiana jednopienna, a druga dwupienna. W innym eksperymencie wartość energetyczna biomasy osiągnął prawie 300 GJ ha^{-1} (Kreuger i in. 2011a), jednakże do jego obliczenia przyjęto HHV zamiast LHV. W efekcie tego wartość ta była zawyżona m.in. przez brak uwzględnienia H w biomasie, która podczas spalania tworzy wodę obdarowywującą z procesu. W praktyce, przy spalaniu bez kondensacji spalin, użyteczna energia jest bliższa LHV, która uwzględnia straty związane z parowaniem wody zależne m.in. H w paliwie. Odmiana Białobrzeskie posiadała wyższą wartość energetyczną biomasy (151,36 GJ ha^{-1}) w porównaniu do wieloletnich roślin energetycznych takich jak *Silphium perfoliatum* (142,3 GJ ha^{-1} y^{-1}) czy *Helianthus salicifolius* (124,7 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski i in. 2024a). Natomiast w porównaniu do *Miscanthus* × *giganteus* była niższa (235–479 GJ ha^{-1} y^{-1} (Felten i in. 2013; Iqbal i in. 2015; Jankowski i in. 2016; Muylle i in. 2015).

Łodygi konopi można wykorzystać jako paliwo stałe, uzyskując do 246 GJ ha^{-1} (Chaowana i in. 2024), co nie odnajduje odzwierciedlenia w wynikach niniejszego eksperymentu, gdzie średnia wartość energetyczną łodyg wyniosła maksymalnie 131,93 GJ ha^{-1} rok^{-1} dla Białobrzeskie (tab. 30). Warto podkreślić, że łodygi mają “ukrytą” wartość energetyczną poza samym spalaniem, np. w scenariuszu biorefineryjnym, gdzie możliwa jest współprodukcja etanolu i metanu (Kreuger i in. 2011b).

4.9.2. Nakłady energetyczne

Nakłady energetyczne produkcji samych łodyg były istotnie różnicowane przez odmianę oraz interakcję odmiany z rokiem ($p < 0{,}001$) (tab. 29). Natomiast nakłady dla całej biomasy wegetatywnej były istotnie różnicowane przez gatunek, rok i interakcję tych dwóch czynników. Spośród badanych odmian najwyższe nakłady energetyczne samych łodyg (średnio 14,73 GJ ha^{-1}) były w przypadku najwyżej plonującej odmiany Kompolti (tab. 31). W przypadku pozostałych odmian nakłady energetyczne produkcji łodyg zawierały się w zakresie od 12,13 GJ ha^{-1} do 14,46 GJ ha^{-1}, odpowiednio dla Finola i Santhica 70. Natomiast nakłady związane z produkcją biomasy wegetatywnej badanych odmian zawierały się w zakresie od 12,37 GJ ha^{-1} do 15,02 GJ ha^{-1}, odpowiednio dla Finola i Kompolti. Nakłady energetyczne na produkcję łodyg jak również całej biomasy wegetatywnej w 2024 roku były nieznacznie wyższe w porównaniu do 2025, co wynikało z wyższych plonów biomasy. Podobnie, wyższe nakłady energetyczne wystąpiły w przypadku przeprowadzenia zbioru kwiatów.

Tabela 31. Nakłady energii w produkcji łodyg konopi oraz całkowite nakłady energii (dla łodyg i biomasy wegetatywnej) w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów.

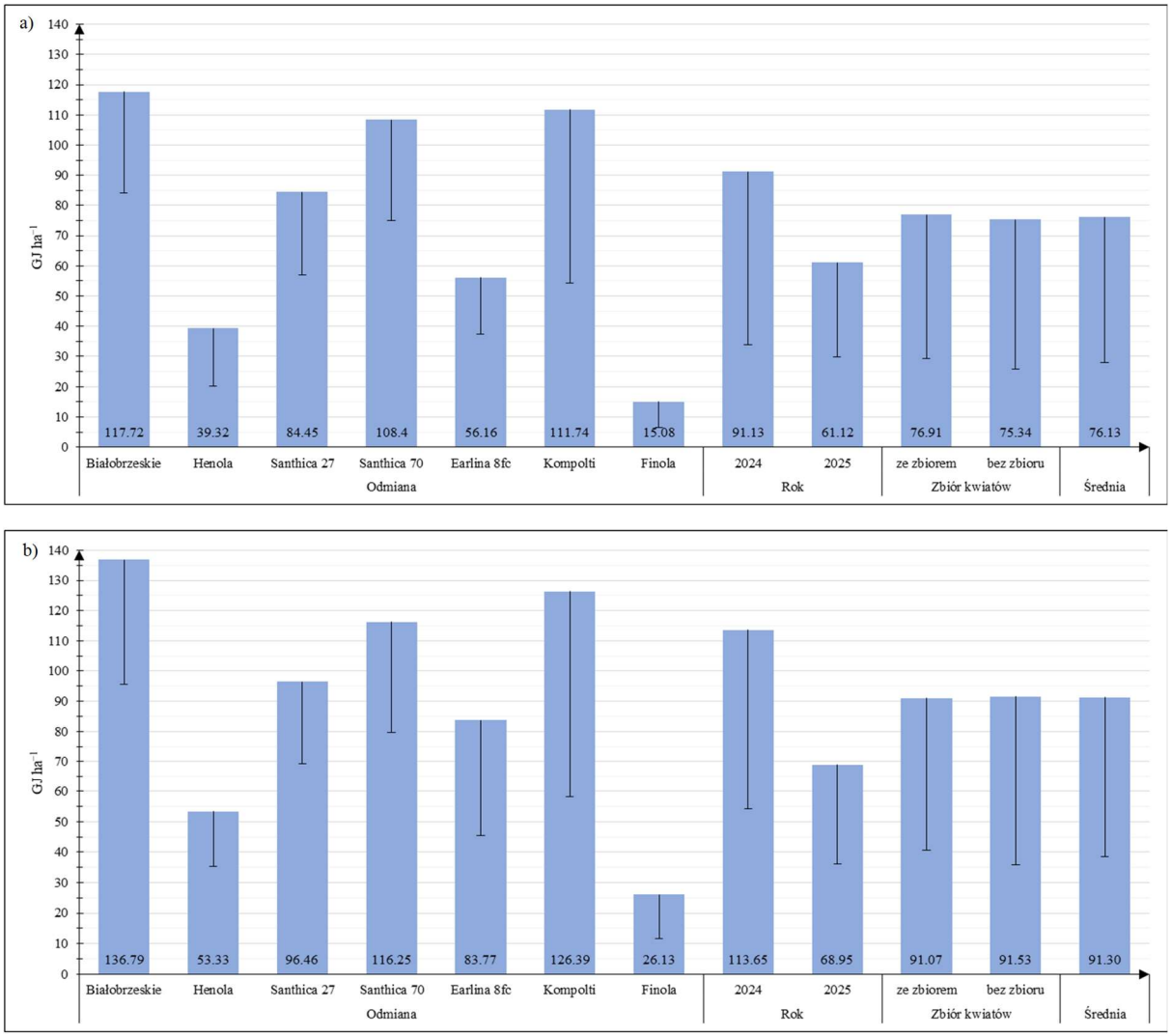
Źródło zmienności	Obiekt	Nakłady materiałowe (GJ ha^{-1})	Nakłady pracy ludzkiej (GJ ha^{-1})	Nakłady związane z wykorzystaniem ciągników i maszyn (GJ ha^{-1})	Nakłady ze zużycia paliwa (GJ ha^{-1})	Całkowity nakład dla łodyg (GJ ha^{-1})	Całkowity nakład dla biomasy wegetatywnej (GJ ha^{-1})
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	7,86 ± 0,00	0,73 ± 0,04 ab	0,90 ± 0,07 ab	4,72 ± 0,42 ab	14,20 ± 0,54 ab	14,57 ± 0,59 ab
	Henola (H)	7,87 ± 0,00	0,61 ± 0,04 c	0,70 ± 0,07 c	3,51 ± 0,43 c	12,68 ± 0,54 c	12,96 ± 0,49 cd
	Santhica 27 (S27)	7,92 ± 0,00	0,70 ± 0,05 b	0,85 ± 0,08 b	4,41 ± 0,50 b	13,88 ± 0,63 b	14,15 ± 0,59 b
	Santhica 70 (S70)	7,92 ± 0,00	0,74 ± 0,06 ab	0,93 ± 0,10 ab	4,88 ± 0,58 ab	14,46 ± 0,73 ab	14,65 ± 0,79 ab
	Earlina 8fc (E)	7,84 ± 0,00	0,61 ± 0,03 c	0,70 ± 0,05 c	3,55 ± 0,28 c	12,71 ± 0,35 c	13,11 ± 0,35 c
	Kompolti (K)	8,02 ± 0,00	0,76 ± 0,10 a	0,95 ± 0,17 a	5,00 ± 1,01 a	14,73 ± 1,28 a	15,02 ± 1,39 a
	Finola (F)	7,84 ± 0,00	0,56 ± 0,01 c	0,63 ± 0,02 c	3,09 ± 0,10 c	12,13 ± 0,13 c	12,37 ± 0,22 d
Rok (Y)	2024 (24)	7,90 ± 0,06	0,68 ± 0,11	0,82 ± 0,18	4,22 ± 1,08	13,62 ± 1,41	14,00 ± 1,41 a
	2025 (25)	7,90 ± 0,06	0,67 ± 0,06	0,80 ± 0,11	4,11 ± 0,64	13,47 ± 0,84	13,67 ± 0,86 b
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem (FH)	7,90 ± 0,06	0,68 ± 0,09	0,82 ± 0,15	4,25 ± 0,92	13,65 ± 1,20	13,94 ± 1,20
	bez zbioru (NFH)	7,90 ± 0,06	0,66 ± 0,09	0,79 ± 0,14	4,08 ± 0,85	13,43 ± 1,11	13,72 ± 1,14
Średnia		7,90 ± 0,06	0,67 ± 0,09	0,81 ± 0,15	4,17 ± 0,88	13,54 ± 1,16	13,83 ± 1,17

a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Całkowity nakład energetyczny bez zróżnicowania na żaden z czynników głównych (13,54 dla łodyg i 13,84 GJ ha^{-1} dla biomasy wegetatywnej) (tab. 31) był wyższy w porównaniu do wieloletnich roślin przemysłowych takich jak *S. perfoliatum* (11,3 GJ ha^{-1} y^{-1}) czy *H. salicifolius* (9,2 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski i in. 2024a). Niższy nakład dla konopi przemysłowych (nie podano odmiany) wynoszący 10,2 GJ ha^{-1} uzyskano w badaniach na Litwie (Romaneckas i in. 2023), jednakże zastosowano znacznie niższe nawożenie azotowe (45 vs. 120 kg ha^{-1}) i niższe nawożenie potasowe (45 vs. 60 kg ha^{-1}). Zgodnie z Finnan i Styles (2013) w uprawie konopi głównym czynnikiem kształtującym nakłady energetyczne jest nawożenie azotowe. W strukturze nakładów materiałowych rodzaj nawożenia oraz jego wielkość generują największe nakłady, przy czym nawozy mineralne posiadają wysokie wskaźniki energochłonności (Dubis i in. 2020; Jankowski i in. 2021; Jankowski i in. 2020; Jankowski i in. 2016; Stolarski i in. 2017). W związku z tym istnieje możliwość obniżenia nakładów w produkcji konopi poprzez zastosowanie mniej energochłonnych nawozów, np. odpadów organicznych (Barbosa i in. 2014; Dubis i in. 2020). Finnan i Styles (2013) rozważyli dwa źródła składników pokarmowych dla konopi: nawozy mineralne oraz nawozy organiczne (obornik/gnojowica/osady ściekowe). Zastosowanie nawozów organicznych w modelowanych scenariuszach obniżało emisje z uprawy i zwiększało potencjał redukcji emisji w całym łańcuchu, a także poprawiało ekonomikę uprawy w porównaniu z wariantem nawożenia mineralnego. Mineralne nawożenie azotowe i wapnowanie może spowodować nawet 3-krotny wzrost nakładów energetycznych, tak jak miało to miejsce w przypadku wieloletniego *S. perfoliatum* (Siaudinis i in. 2017; Siaudinis i in. 2012).

4.9.3. Uzysk energii

Średni uzysk energii dla samych łodyg wyniósł 76,13 GJ ha^{-1}, a wartość tego wskaźnika dla całej biomasy wegetatywnej była średnio o 20% wyższa (rys. 15 a,b). Najwyższą wartość dla łodyg stwierdzono w przypadku Białobrzeskie (średnio 117,2 GJ ha^{-1}), a najniższą, o 87% niższą względem Białobrzeskie, dla odmiany Finola. W przypadku uzysku energii z całej biomasy wegetatywnej również najwyższą wartość uzyskano dla Białobrzeskie (średnio 136,79 GJ ha^{-1}), a najniższą dla Finola (26,13 GJ ha^{-1}). W 2024 roku uzysk energii z łodyg (średnio 91,13 GJ ha^{-1}) jak również z całej biomasy wegetatywnej (113,65 GJ ha^{-1}) był wyższy o odpowiednio 49% i 65% w porównaniu do 2025, co wynikało głównie z wyższych plonów biomasy w 2024 roku.



Rysunek 15. Średni uzysk energii z produkcji łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku.

W badaniach przeprowadzonych na Litwie uzysk energii dla biomasy konopi wyniósł 139,9 GJ ha^{-1} (Romaneckas i in. 2023), co było wynikiem porównywalnym do Białobrzeskie (136,79 GJ ha^{-1}, rys. 15 b), przy czym pozostałe odmiany uzyskały niższe wartości. Kolarikova i in. (2013) uzyskali z kolei dla Białobrzeskie 164,1 GJ ha^{-1} dla zbioru jesiennego oraz 144,5 GJ ha^{-1} dla zbioru wiosennego, przy czym do obliczeń wykorzystano HHV co mogło zawyżyć wyniki (w niniejszych badaniach użyto w obliczeniach LHV, która uwzględnia również H). Z drugiej strony w badaniach Kolarikova i in. (2013) nakład energetyczny obejmował nie tylko etap polowy, ale również późniejsze dodatkowe operacje przygotowania paliwa stałego (m.in. brykietowanie, a dla zbioru jesiennego także dosuszanie), co mogło zawyżyć całkowity nakład energetyczny względem analiz ograniczonych do samej uprawy, a tym samym spowodować zmniejszenie uzysku energii. W łańcuchu biopaliw stałych przetwarzanie

(kompaktowanie, brykietowanie) potrafi być największym konsumentem energii (Kolarikova i in. 2014). To dobrze pokazało, że uzysk energii zależy od przyjętych granic systemu. Białobrzeskie uzyskały wyższy uzysk energii w porównaniu do lnianki siewnej *Camelina sativa* czy pszenicy orkisz *Triticum spelta* (średnio 84,62 i 91,62 GJ ha^{-1}, odpowiednio) (Stolarski i in. 2025). Ten uzysk był również wyższy w porównaniu do wieloletniej rośliny przemysłowej *S. perfoliatum* (średnio 131,0 GJ ha^{-1} y^{-1}) jak i *H. salicifolius* (średnio 115,4 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski i in. 2024a). Natomiast, jeżeli uwzględni się obiekty, w których zastosowano mineralne nawożenie azotowe równe 85 kg ha^{-1} y^{-1} to uzysk energii dla *S. perfoliatum* był już wyższy (średnio 145,1 GJ ha^{-1} y^{-1}), natomiast dla *H. salicifolius* w dalszym ciągu niższy (średnio 128 GJ ha^{-1} y^{-1}). Znacznie wyższe uzyski (213–449 GJ ha^{-1} y^{-1}) były z produkcji miskanta olbrzymiego *M.* × *giganteus* (Dubis i in. 2020; Felten i in. 2013; Iqbal i in. 2015; Jankowski i in. 2016).

4.9.4. Energochłonność

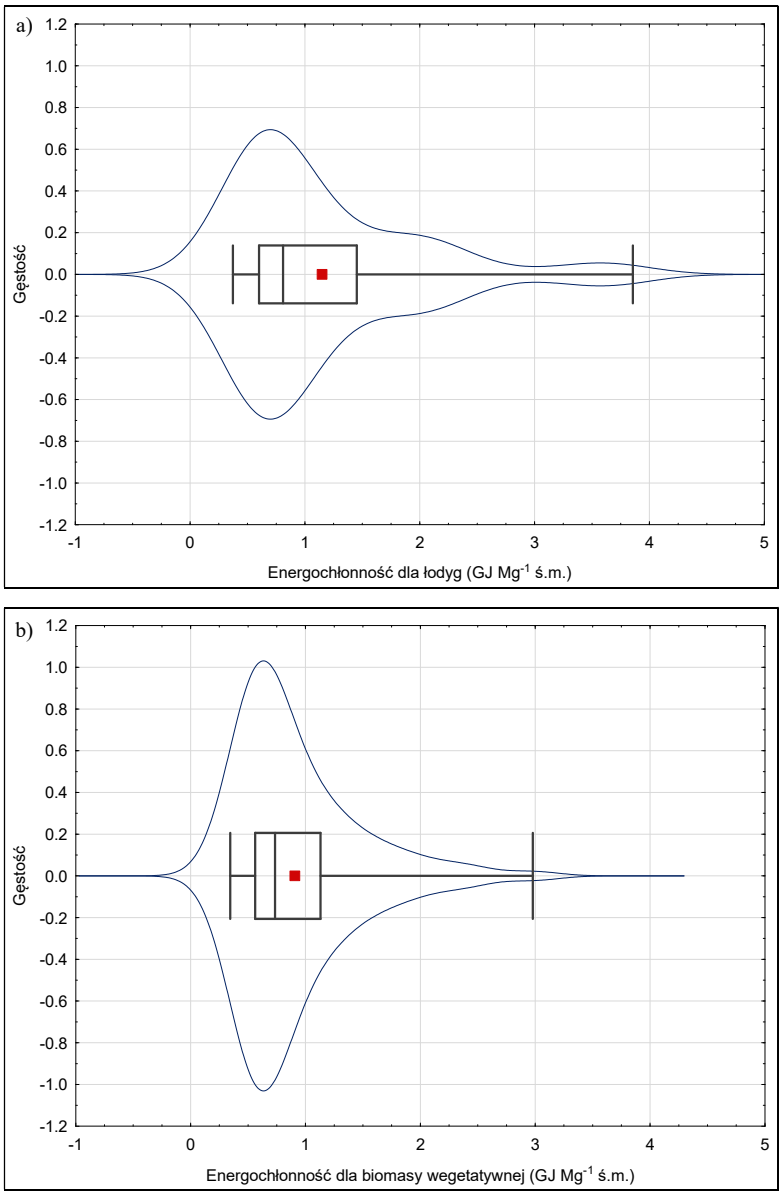
Energochłonność produkcji zrębków łodyg wyniosła średnio 1,15 GJ Mg^{-1} ś.m., a w przypadku całej wegetatywnej biomasy wartość ta była niższa o 21% (tab. 32). W przypadku badanych odmian najniższą wartość dla świeżych zrębków łodyg stwierdzono dla Santhica 70 (0,60 GJ Mg^{-1} ś.m.). W tej samej grupie jednorodnej były odmiany Białobrzeskie, Kompolti i Santhica 27. Natomiast u pozostałych odmian wartość tego wskaźnika była wyższa w zakresie od 120% do 309% odpowiednio dla Earlina i Finola. Wskaźnik energochłonności produkcji suchych zrębków łodyg wyniósł średnio 2,97 GJ Mg^{-1} s.m., a w przypadku całej wegetatywnej biomasy wartość ta była niższa o 17%. Najniższą wartość tego wskaźnika w odniesieniu do suchej masy łodyg stwierdzono dla Białobrzeskie (1,59 GJ Mg^{-1} s.m.). W tej samej grupie jednorodnej były odmiany Santhica 70, Santhica 27 i Kompolti. Natomiast u pozostałych odmian wartość tego wskaźnika była wyższa w zakresie od 78% do 329% odpowiednio dla Earlina i Finola. Energochłonność dla suchych łodyg w 2024 roku była istotnie niższa (średnio 2,74 GJ Mg^{-1} s.m.) w porównaniu do 2025 roku.

Tabela 32. Energochłonność produkcji łodyg i całej biomasy wegetatywnej konopi włóknistych w zależności od odmiany, roku i zbioru kwiatów.

Źródło zmienności	Obiekt	Energochłonność dla świeżych łodyg (GJ Mg^{-1} ś.m.)	Energochłonność dla łodyg (GJ Mg^{-1} s.m.)	Energochłonność dla świeżej biomasy wegetatywnej (GJ Mg^{-1} ś.m.)	Energochłonność dla biomasy wegetatywnej (GJ Mg^{-1} s.m.)
Odmiana (C)	Białobrzeskie (B)	0,62 ± 0,12 c	1,59 ± 0,37 c	0,56 ± 0,10 c	1,49 ± 0,35 d
	Henola (H)	1,69 ± 1,06 b	4,02 ± 2,07 b	1,19 ± 0,47 b	2,88 ± 0,86 b
	Santhica 27 (S27)	0,78 ± 0,37 c	2,12 ± 0,92 c	0,67 ± 0,20 c	1,88 ± 0,59 cd
	Santhica 70 (S70)	0,60 ± 0,11 c	1,66 ± 0,33 c	0,57 ± 0,10 c	1,54 ± 0,31 d
	Earlina 8fc (E)	1,31 ± 0,34 b	2,83 ± 0,60 bc	0,98 ± 0,19 b	2,48 ± 0,54 bc
	Kompolti (K)	0,62 ± 0,19 c	1,77 ± 0,60 c	0,58 ± 0,19 c	1,64 ± 0,53 d
	Finola (F)	2,43 ± 0,64 a	6,81 ± 2,37 a	1,80 ± 0,54 a	5,31 ± 2,02 a
Rok (Y)	2024 (24)	1,21 ± 0,86	2,74 ± 1,89 b	0,88 ± 0,47	2,12 ± 1,07 b
	2025 (25)	1,08 ± 0,79	3,20 ± 2,41 a	0,93 ± 0,57	2,80 ± 1,86 a
Zbiór kwiatów (F)	ze zbiorem (FH)	1,08 ± 0,75	2,89 ± 2,16	0,87 ± 0,50	2,45 ± 1,62
	bez zbioru (NFH)	1,22 ± 0,89	3,05 ± 2,20	0,94 ± 0,54	2,47 ± 1,49
Średnia		1,15 ± 0,82	2,97 ± 2,16	0,91 ± 0,52	2,46 ± 1,55

a, b, c – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Rozstęp międzykwartylowy dla świeżej biomasy wegetatywnej był mniejszy w porównaniu do świeżych łodyg, zatem środkowe 50% obserwacji dla biomasy wegetatywnej było bardziej skupione, czyli wskaźnik energochłonności był bardziej stabilny między kombinacjami czynników (rys. 16). Dla łodyg częściej pojawiały się przypadki o podwyższonej energochłonności, natomiast dla biomasy wegetatywnej było ich mniej (porównanie długości oraz wysokości prawych ogonów dla obu rozkładów). Biomasa wegetatywna odznaczyła się wyższym, a zarazem węższym pikiem gęstości (silniejsze skupienie wyników), a łodygi miały pik niższy i bardziej „rozlany", co dodatkowo wzmocniło wniosek o większej jednorodności wyników dla biomasy wegetatywnej.

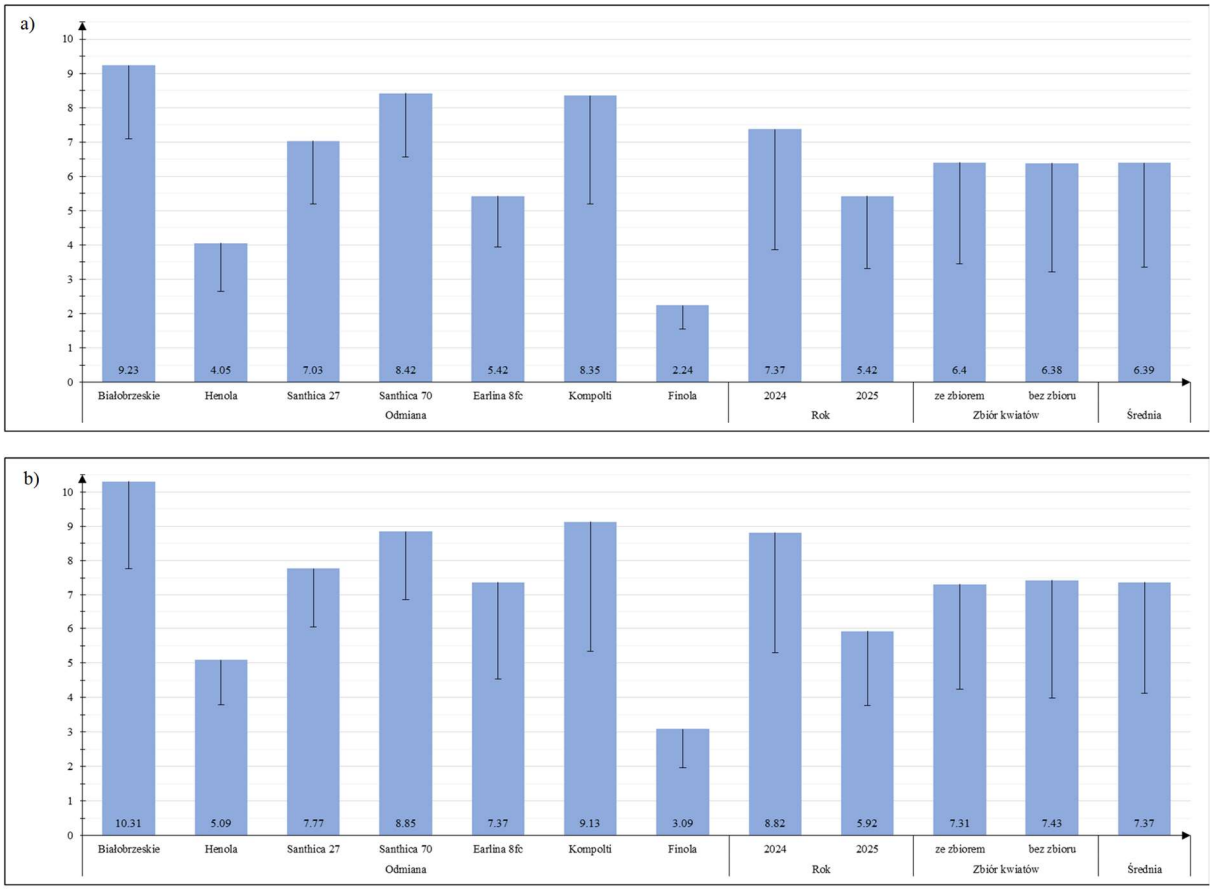


Rysunek 16. Wykresy skrzypcowe energochłonności produkcji łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych.

Brakuje badań, w których zdefiniowana byłaby energochłonność dla uprawy konopi, mimo że w niektórych badaniach określono m.in. nakłady energetyczne czy plon biomasy (Kolarikova i in. 2014; Kolarikova i in. 2013). Najniższe wskaźniki energochłonności uzyskane dla Santhica 70, Białobrzeskie, Kompolti i Santhica 27 (0,60−0,78 GJ Mg^{-1} ś.m. dla łodyg i 0,56−0,67 GJ Mg^{-1} ś.m. dla biomasy wegetatywnej; tab. 32) były wyższe w porównaniu dla średnich zdefiniowanych dla wieloletnich *S. perfoliatum* czy *H. salicifolius* (0,34 i 0,49 GJ Mg^{-1} ś.m., odpowiednio) (Stolarski i in. 2024a). Po uwzględnieniu nawożenia mineralnego azotem na poziomie 85 kg ha^{-1} (0,36 i 0,49 GJ Mg^{-1} ś.m., odpowiednio) również były to wartości wyższe. Dopiero przy dawce azotu 170 kg ha^{-1} najniższe wartości dla konopi odpowiadały *H. salicifolius* (0,61 GJ Mg^{-1} ś.m.). Natomiast *S. perfoliatum* (0,40 GJ Mg^{-1} ś.m.) w dalszym ciągu posiadał niższą energochłonność. Dobrze to obrazuje wzrost energochłonności wynikający ze zwiększania dawek nawożenia (w niniejszym eksperymencie dla konopi każdorazowo zastosowano 120 kg ha^{-1} mineralnego azotu). Natomiast energochłonność określona dla suchej masy tych samych odmian (1,59−2,12 GJ Mg^{-1} s.m. dla łodyg oraz 1,49−1,88 GJ Mg^{-1} s.m. dla biomasy wegetatywnej; tab. 32) była z kolei zbliżony do średniej wartości dla *H. salicifolius* i *S. perfoliatum* (1,4 GJ Mg^{-1} s.m. dla obu gatunków) (Stolarski i in. 2024a). Tak samo było w przypadku zastosowania nawożenia mineralnego azotem w dawce 85 kg ha^{-1} (1,4 GJ Mg^{-1} s.m. dla obu gatunków). Z kolei dawka azotu 170 kg ha^{-1} spowodowała, że energochłonność tych dwóch gatunków zmieściła się w wyżej podanym przedziale dla konopi (1,7 i 1,8 GJ Mg^{-1} s.m., odpowiednio). Energochłonność konopi w przeliczeniu na suchą masę wypadła korzystniej w zestawieniu z tymi dwoma bylinami, gdyż W świeżej masy bylin była wyższa w porównaniu do W świeżej masy konopi. Wskaźniki wyrażone w GJ Mg^{-1} ś.m. faworyzują gatunki zbierane z wyższą wilgotnością, ponieważ przy podobnych nakładach liczonych na hektar pojawia się w mianowniku większa liczba ton świeżej masy. Po przeliczeniu na suchą masę eliminowany jest wpływ wody, a porównanie dotyczy rzeczywistej masy pozyskanej substancji organicznej, przez co przewagi zaobserwowane w przeliczeniu na świeżą masę uległy zmniejszeniu. Energochłonność dla jeszcze innej byliny, ślazowca pensylwańskiego *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, miała średnią wartość (z trwającego trzynaście lat eksperymentu) 3,26 GJ Mg^{-1} r^{-1} s.m. (Kwiatkowski i in. 2023), a zatem wyższą w porównaniu do najlepszych konopi z niniejszego eksperymentu. Natomiast znacznie niższą energochłonność uzyskano dla *M.* × *giganteus* (0,24–0,74 GJ Mg^{-1} s.m.) (Iqbal i in. 2015; Jankowski i in. 2016), wierzb *Salix* spp. (0,59–0,79 GJ Mg^{-1} s.m.) czy topól *Populus* spp. (0,65–0,85 GJ Mg^{-1} s.m.) (Stolarski i in. 2016).

4.9.5. Wskaźnik efektywności energetycznej

Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków łodyg oraz całej biomasy wegetatywnej był istotnie ($p < 0,001$) zróżnicowane przez odmianę i rok oraz współdziałanie tych dwóch czynników (tab. 29). Dla łodyg wyniósł średnio 6,39, a dla biomasy wegetatywnej był średnio 15% wyższy (rys. 17 a, b). Spośród odmian najwyższy wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków łodyg stwierdzono dla Białobrzeskie (średnio 9,23; grupa jednorodna „a"). W pośredniej grupie jednorodnej „ab" znalazły się Santhica 70 i Kompolti, u których wartość tego wskaźnika dla łodyg była niższa w zakresie 9-10%. W przypadku pozostałych odmian wskaźnik dla łodyg był niższy w zakresie od 24% do 76%, odpowiednio dla Santhica 27 i Finola (w porównaniu do Białobrzeskie). W związku z powyższym kolejność badanych odmian pod względem wskaźnika efektywność energetycznej dla łodyg przedstawił się następująco: B>S70>K>S27>E>H>F. Podobne zależności w kolejności badanych odmian stwierdzono w przypadku wskaźnika dla biomasy wegetatywnej, ponieważ najwyższą wartość uzyskano w przypadku Białobrzeskie (średnio 10,31), a najniższą dla Finola (3,09). W 2024 roku średnia wartość dla łodyg (7,37) jak również dla biomasy wegetatywnej (8,82) była wyższa o odpowiednio 36% i 49% w porównaniu do roku 2025, co wynikało głównie z wyższych plonów biomasy w roku 2024, przy zbliżonych nakładach energetycznych.



Rysunek 17. Średni wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków z łodyg (a) i biomasy wegetatywnej (b) konopi włóknistych w zależności od odmiany, zbioru kwiatów i roku.

Najwyższy wskaźnik efektywności energetycznej uzyskany dla Białobrzeskie (9,23 dla produkcji zrębków łodyg oraz 10,31 dla biomasy wegetatywnej) (rys. 17 a, b) był wyższy w porównaniu do wskaźnika efektywności uzyskanego dla tej samej odmiany uprawianej w Czechach, gdzie wyniósł on 8,6 dla zbioru wiosennego oraz 7,4 dla zbioru jesiennego (Kolarikova i in. 2013). Dla zbioru wiosennego był wyższy, ponieważ miała miejsce znaczna redukcja zużycia energii dzięki wyeliminowaniu osuszaczy (nie były one potrzebne z powodu niskiej wilgotności biomasy w tym okresie, tj. 19%). Pomimo to wskaźnik był i tak niższy w porównaniu do Białobrzeskie z niniejszego doświadczenia, co mogło wynikać z szerszej granicy systemu w badaniach czeskich, w których uwzględniono także brykietowanie biomasy, czyli dodatkowe źródło zapotrzebowania na energię. W innym badaniu przeprowadzonym w Mołdawii uzyskano z kolei wyższy wskaźnik efektywności energetycznej względem niniejszego eksperymentu, tj. 13,1 dla Białobrzeskie (Kolarikova i in. 2014). Jednakże w tym badaniu uwzględniono specyfikę ówczesnego rolnictwa w Mołdawii, tj. duży

udział pracy ręcznej oraz brak stosowania nawozów, co − pomimo dodatkowych nakładów na brykietowanie – przełożyło się na wysoką wartość wskaźnika. Ponadto wartość energetyczna zebranej biomasy była wyższe (191,9 GJ ha^{-1} w zacytowanych badaniach vs. 151,36 GJ ha^{-1} dla biomasy wegetatywnej, tab. 30).

Natomiast najwyższy wskaźnik efektywności energetycznej dla Białobrzeskie (9,23 dla łodyg oraz 10,31 dla biomasy wegetatywnej; rys. 17 a, b) był w większości przypadków niższy względem wieloletnich roślin energetycznych takich jak *H. salicifolius* (13,3 przy nawożeniu mineralnym azotem równym 85 kg ha^{-1} i 10,2 przy 170 kg ha^{-1}) czy *S. perfoliatum* (14,2 przy nawożeniu mineralnym azotem równym 85 kg ha^{-1} i 12,8 przy 170 kg ha^{-1}) (Stolarski i in. 2024a). W porównaniu do innej wieloletniej rośliny energetycznej, *S. hermaphrodita* (średni wskaźnik efektywności energetycznej dla trzech typów materiału rozmnożeniowego przy dwóch początkowych gęstościach siewu/sadzenia, w ośmiu powtórzeniach, w okresie 13 lat: 14,8) (Kwiatkowski i in. 2023) konopie również wypadły gorzej. Idąc dalej, spośród różnych gatunków wieloletnich roślin energetycznych produkcja *M. × giganteus* potrafi osiągnąć wskaźnik wynoszący aż 40 (Boehmel i in. 2008; Iqbal i in. 2015; Muylle i in. 2015). Również dla produkcji innych wieloletnich roślin energetycznych wskaźnik ten może być wysoki i sięgać prawie 30 dla wierzby czy 26 dla topoli (Stolarski i in. 2016). Wyższy wskaźnik w przypadku roślin wieloletnich może wynikać m.in. z tego, że ta grupa roślin nie wymaga corocznych takich samych nakładów energii (Kolarikova i in. 2013).

Warto podkreślić, że wskaźnik efektywności energetycznej produkcji roślin można znacznie poprawić dzięki zastosowaniu nawozów stanowiących pozostałości/z recyklingu (Dubis i in. 2022; Dubis i in. 2020; Gissen i in. 2014; Jankowski i in. 2021). To istotne, ponieważ w tym eksperymencie zastosowano wyłącznie nawożenie mineralne i to tylko w jednej stałej dawce. Przykładowo po zastąpieniu nawozów mineralnych osadami ściekowymi wskaźnik efektywności energetycznej w produkcji *H. tuberosus* wzrósł o 78–89% (Jankowski i in. 2021), a *M. × giganteus* o 43–52% (Dubis i in. 2020).

5. Wnioski

1. W warunkach marginalnych gleb północno-wschodniej Polski wyniki produkcyjne konopi włóknistych w koncepcji produkcji wielokierunkowej (biomasa–kwiaty/olejek eteryczny–nasiona) były przede wszystkim determinowane przez genotyp, z modulacją przez sezon wegetacyjny/rok. Wyraźnie słabe wschody w 2023 roku (związane z suszą w tym okresie) skutkowały znacznym obniżeniem efektów produkcyjnych, co wskazuje, że hydrotermiczne warunki sezonu są krytycznym czynnikiem ryzyka dla konopi uprawianych na glebach niskiej jakości.
2. W przekroju sezonów plon suchej masy kwiatów osiągnął maksimum w 2024 roku (0,53 Mg ha^{-1} s.m.) i wyraźnie obniżył się w 2025 i 2023 roku, co wskazuje na wysoką wrażliwość frakcji kwiatowej na warunki sezonu wegetacyjnego na glebie lekkiej i jednocześnie kwaśnej. Różnice między odmianami były wyraźne: Białobrzeskie uzyskała najwyższy średni plon kwiatów (0,71 Mg ha^{-1}), podczas gdy Finola najniższy (0,35 Mg ha^{-1}). Plon olejku eterycznego z kwiatów odzwierciedlał łączny efekt biomasy kwiatów i stężenia olejku; najwyższy średni plon olejku uzyskano u odmiany Białobrzeskie (1,73 L ha^{-1}), podczas gdy Santhica 27 była najmniej produktywna pod względem tej cechy.
3. Ręczny zbiór kwiatów w fazie kwitnienia zwiększał uzysk olejku eterycznego na poziomie całego systemu bez istotnego wpływu na produkcję biomasy. Konkretnie, zbiór kwiatów zwiększył całkowity plon olejku eterycznego (sumę olejku z kwiatów i biokoncentratu) o 165%, podczas gdy plon biomasy i plon biomasy ogółem nie różniły się istotnie, co potwierdza wykonalność dwukierunkowego gospodarowania na stanowiskach marginalnych. Najwyższe całkowite plony olejku eterycznego odnotowano dla odmian Białobrzeskie, Henola i Kompolti (2,08–2,39 L ha^{-1}). Zaobserwowano również wyraźny efekt roku, przy czym 2024 przewyższał 2025 (średnia dla odmian: 1,47 vs. 0,84 L ha^{-1}).
4. Biokoncentrat (pozostałość po omłocie) okazał się istotnym współproduktem, którego ilość i plon olejku eterycznego były zależne od odmiany, a którego plon olejku był dodatkowo kształtowany przez interakcję odmiana × rok, co podkreśla znaczenie dopasowania genotypu i sezonowości przy waloryzacji pozostałości przetwórczych.
5. Analiza wielowymiarowa rozdzieliła odmiany na spójne grupy funkcjonalne (odmiany typu biomasowego vs. odmiany typu kwietno-nasiennego) i wykazała,

że pomimo przesunięć wywołanych zbiorem kwiatów, genotyp pozostał dominującym czynnikiem kształtującym ogólne profile użytkowe. W przypadku zrównoważonej produkcji wielokierunkowej (olejek eteryczny, nasiona i biomasa) najbardziej obiecującymi wyborami były Henola i Earlina 8fc ze zbiorem kwiatów. W celu maksymalizacji olejku eterycznego oraz biomasy preferowane były Białobrzeskie i Kompolti ze zbiorem kwiatów, natomiast strategie ukierunkowane na nasiona były najlepiej reprezentowane przez Henolę bez zbioru kwiatów i Finolę ze zbiorem kwiatów.

6. Skład i właściwości łodyg były przede wszystkim determinowane przez rok uprawy, podczas gdy efekt odmiany ujawniał się nie jako stałe, lecz wtórne źródło zmienności. Skład proksymalny/przybliżony, frakcje lignocelulozowe oraz substancje ekstrakcyjne wykazywały wyraźne profile specyficzne dla odmian, natomiast analiza elementarna wykazała ograniczone zróżnicowanie genotypowe pod względem C, H i S; jedynie N i Cl były istotne i determinowały profil składu elementarnego.
7. Analizy wielowymiarowe potwierdziły, że łodygi konopi grupowały się głównie według roku, przy czym zmienność związana z odmianą występowała w obrębie grup sezonowych, co podkreśla znaczenie interakcji odmiana × rok w ocenie jakości biomasy. Ogólnie wyniki wskazały, że łodygi konopi włóknistych stanowią heterogeniczny surowiec, którego jakość można optymalizować poprzez świadomy dobór odmiany połączony z uwzględnieniem zależnych od sezonu wegetacyjnego efektów środowiskowych. Wykorzystanie wiedzy o tych zależnościach może dodatkowo zwiększyć potencjał łodyg konopi w zastosowaniach, np. bioenergetycznych czy biorafineryjnych.
8. Łodygi odmiany Finola różniły się najbardziej od pozostałych odmian, między innymi ze względu na jednocześnie istotnie najwyższą zawartość N, Cl, Hem, Lig, HWE, OSS i HHV. Henola i Earlina 8fc miały, w porównaniu z Finolą, niższe HHV czy W. Ta trzyobiektowa grupa różniła się od drugiej, czteroobiektowej grupy (Kompolti, Białobrzeskie, Santhica 27 i Santhica 70), między innymi niższą zawartością VM i Cel przy jednocześnie wyższej zawartości A, N, Cl, Hem, HWE czy OSS. Ten czteroobiektowy klaster tworzyły odmiany wyższe, o dłuższym cyklu rozwojowym, przeznaczone do produkcji biomasy lub włókna. Natomiast grupa trzyobiektowa obejmowała odmiany niższe, o krótszym cyklu rozwojowym,

przeznaczone do produkcji nasion, kwiatów czy olejku eterycznego (mogą być określane jako odmiany nasienno-kwiatowe).

9. Opracowano pierwszy kompleksowy profil chemiczny i energetyczny stałej pozostałości po hydrodestylacji konopi obejmujący siedem odmian. Analiza wykazała, że pozostałość ta charakteryzuje się wysoką wilgotnością oraz podwyższoną zawartością popiołu, co obecnie ogranicza jej bezpośrednie wykorzystanie do spalania lub produkcji biowęgla. Jednak stosunkowo wysoka zawartość części lotnych, umiarkowana zawartość węgla związanego oraz wysoka całkowita zawartość substancji ekstrakcyjnych wskazują na potencjał waloryzacji poprzez procesy konwersji biochemicznej, takie jak fermentacja beztlenowa, zwłaszcza przy współfermentacji z innymi substratami. Niski stosunek C/N oraz wysoka zawartość azotu i popiołu dodatkowo potwierdzają przydatność tej biomasy jako dodatku w produkcji biogazu, gdzie może ona potencjalnie zwiększać aktywność mikrobiologiczną oraz zdolność buforową.
10. Zaobserwowano istotne różnice między odmianami dla większości parametrów stałej pozostałości po hydrodestylacji co wskazuje, że genotyp konopi może być dobierany w zależności od zamierzonej ścieżki konwersji pozostałości. Na szczególną uwagę zasługuje odmiana Finola, która wykazywała wyraźnie odmienny profil, co może mieć znaczenie dla ukierunkowanego zastosowania.
11. Plon biomasy łodyg konopi przemysłowych (czyli pozostałości po wykorzystaniu kwiatostanów/biokoncentratu na bioprodukty o wyższej wartości dodanej), nakłady energetyczne na ich produkcję, uzysk energii czy wskaźnik efektywności energetycznej były głównie różnicowane przez odmianę, częściowo przez lata badań/sezony wegetacyjne i współdziałania tych czynników. Generalnie najstarsza krajowa (rodzima) odmiana konopi włóknistych (Białobrzeskie), o dłuższym okresie wegetacji, charakteryzowała się najwyższymi wartościami takich wskaźników jak plon łodyg, ich wartość energetyczna, uzysk energii i wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków. Dosyć zbliżone, choć niższe, wskaźniki uzyskano dla starszej nierodzimej odmiany Kompolti i nierodzimej Santhica 70, o najdłuższych okresach wegetacji. Natomiast zdecydowanie najniższe wskaźniki w tym zakresie uzyskano dla odmiany Finola, o najkrótszym okresie wegetacji. Ponadto stwierdzono, że uwzględniając całą biomasę wegetatywną (oprócz nasion) następował znaczący wzrost wartości energetycznej plonu, uzysku energii i wskaźnika efektywności energetycznej.

6. Literatura

1. Abdollahi, M., Sefidkon, F., Calagari, M., Mousavi, A., Mahomoodally, M.F., 2020. Impact of four hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties and stage of plant growth on yield and composition of essential oils. Industrial Crops and Products 155. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112793.
2. Abreu, M., Silva, L., Ribeiro, B., Ferreira, A., Alves, L., Paixão, S.M., Gouveia, L., Moura, P., Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Fernando, A.L., Reis, A., Gírio, F., 2022. Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. Energies (Basel). https://doi.org/10.3390/en15124348.
3. Abu Bakar, M.S., Ahmed, A., Jeffery, S.M., Hidayat, S., Sukri, R.S., Mahlia, T.M.I., Jamil, F., Khurrum, M.S., Inayat, A., Moogi, S., Park, Y.K., 2020. Pyrolysis of solid waste residues from lemon myrtle essential oils extraction for bio-oil production. Bioresour. Technol. 318. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123913.
4. Addo, P.W., Gariepy, Y., Shearer, M., Taylor, N., MacPherson, S., Raghavan, V., Orsat, V., Lefsrud, M., 2024. Microwave-assisted hot air drying of *Cannabis sativa*: Effect of vacuum and pre-freezing on drying kinetics and quality. Ind. Crops Prod. 218. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119015.
5. Adeleke, A.A., Odusote, J.K., Ikubanni, P.P., Lasode, O.A., Malathi, M., Paswan, D., 2021. Essential basics on biomass torrefaction, densification and utilization. Int J Energy Res. https://doi.org/10.1002/er.5884.
6. Alavi-Borazjani, S.A., Capela, I., Tarelho, L.A.C., 2020. Valorization of biomass ash in biogas technology: Opportunities and challenges, in: Energy Reports. Elsevier Ltd, pp. 472–476. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.010.
7. Allende, S., Brodie, G., Jacob, M. V., 2023. Breakdown of biomass for energy applications using microwave pyrolysis: A technological review. Environ Res. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115619.
8. Aloo, S.O., Mwiti, G., Ngugi, L.W., Oh, D.H., 2024. Uncovering the secrets of industrial hemp in food and nutrition: The trends, challenges, and new-age perspectives. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2149468.
9. Altman, A.W., Kent-Dennis, C., Klotz, J.L., McLeod, K.R., Vanzant, E.S., Harmon, D.L., 2024. Review: Utilizing industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) by-

products in livestock rations. Animal Feed Science and Technology. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115850.

10. Amaducci, S., Amaducci, M.T., Benati, R., Venturi, G., 2000. Crop yield and quality parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the North of Italy, Industrial Crops and Products.
11. Ansari, O., De Prato, L., Slaski, J., 2025. A photoperiod-based classification of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) and its agronomic implications. Industrial Crops and Products 233. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121431.
12. Ascrizzi, R., Ceccarini, L., Tavarini, S., Flamini, G., Angelini, L.G., 2019. Valorisation of hemp inflorescence after seed harvest: Cultivation site and harvest time influence agronomic characteristics and essential oil yield and composition. Ind. Crops Prod. 139. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111541.
13. Assirelli, A., Santangelo, E., Stagno, F., Roccuzzo, G., Musio, S., Amaducci, S., 2022. Hemp Sowing Seed Production: Assessment of New Approaches in North-Italy. Sustainability (Switzerland) 14. https://doi.org/10.3390/su142417020.
14. Aubin, M.P., Seguin, P., Vanasse, A., Lalonde, O., Tremblay, G.F., Mustafa, A.F., Charron, J.B., 2016. Evaluation of eleven industrial hemp cultivars grown in Eastern Canada. Agron. J. 108, 1972–1980. https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0217.
15. Azeta, O., Ayeni, A.O., Agboola, O., Elehinafe, F.B., 2021. A review on the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass. Sci Afr. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909.
16. Bajwa, P., Saini, R., Singh, S., Makkar, J., Trostle, C., Singh, H., 2025a. Effect of early and late post emergence herbicides on weed suppression, crop injury, and biomass yield of industrial hemp in semiarid conditions. Agrosystems, Geosciences and Environment 8. https://doi.org/10.1002/agg2.70078.
17. Bajwa, P., Singh, S., Kafle, A., Saini, R., Trostle, C., 2025b. Effect of planting dates and seeding densities on growth, physiology, and yield of industrial hemp. Crop Science 65. https://doi.org/10.1002/csc2.70017.
18. Bajwa, P., Singh, S., Singh, M., Kafle, A., Parkash, V., Saini, R., 2023. Assessing the production potential of industrial hemp in the semi-arid west Texas. Technology in Agronomy 3. https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0017.
19. Baldini, M., Ferfuia, C., Piani, B., Sepulcri, A., Dorigo, G., Zuliani, F., Danuso, F., Cattivello, C., 2018. The performance and potentiality of monoecious hemp

(*Cannabis sativa* L.) cultivars as a multipurpose crop. Agronomy 8. https://doi.org/10.3390/agronomy8090162.

20. Barbosa, D.B.P., Nabel, M., Jablonowski, N.D., 2014. Biogas-digestate as Nutrient Source for Biomass Production of Sida Hermaphrodita, Zea Mays L. and Medicago sativa L. Energy Procedia 59, 120–126. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.357.
21. Bertoli, A., Tozzi, S., Pistelli, L., Angelini, L.G., 2010. Fibre hemp inflorescences: From crop-residues to essential oil production. Ind. Crops Prod. 32, 329–337. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.05.012.
22. Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., Iyyappan, J., 2018. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093.
23. Blandinières, H., Amaducci, S., 2022. Adapting the cultivation of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) to marginal lands: A review. GCB Bioenergy. https://doi.org/10.1111/gcbb.12979.
24. Boehmel, C., Lewandowski, I., Claupein, W., 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. Agric Syst 96, 224–236. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.08.004.
25. Bosch, D., Back, J.O., Gurtner, D., Giberti, S., Hofmann, A., Bockreis, A., 2022. Alternative feedstock for the production of activated carbon with ZnCl2: Forestry residue biomass and waste wood. Carbon Resources Conversion 5, 299–309. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.09.001.
26. Branca, C., Di Blasi, C., Galgano, A., 2017. Experimental analysis about the exploitation of industrial hemp (*Cannabis sativa*) in pyrolysis. Fuel Processing Technology 162, 20–29. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.028.
27. Brandić, I., Voća, N., Gunjača, J., Lončar, B., Bilandžija, N., Peter, A., Šurić, J., Pezo, L., 2024. Biomass higher heating value prediction machine learning insights into ultimate, proximate, and structural analysis datasets. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 46, 2842–2854. https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2309303.
28. Brar, K.K., Raheja, Y., Chadha, B.S., Magdouli, S., Brar, S.K., Yang, Y.H., Bhatia, S.K., Koubaa, A., 2024. A paradigm shift towards production of sustainable

bioenergy and advanced products from *Cannabis*/hemp biomass in Canada. Biomass Conversion and Biorefinery. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02570-6.

29. Bruce, D.M., Hobson, R.N., Hamer, P.J.C., White, R.P., 2005. Drying of hemp for long fibre production. Biosyst. Eng. 91, 45–59. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.002.
30. Burczyk, H., Grabowska, L., Strybe, M., Konczewicz, W., 2009. Effect of sowing density and date of harvest on yields of industrial hemp. Journal of Natural Fibers 6, 204–218. https://doi.org/10.1080/15440470902972588.
31. Burgel, L., Hartung, J., Pflugfelder, A., Graeff-Hönninger, S., 2020. Impact of growth stage and biomass fractions on cannabinoid content and yield of different hemp (*Cannabis sativa* L.) genotypes. Agronomy 10. https://doi.org/10.3390/agronomy10030372.
32. Butkutė, B., Liaudanskienė, I., Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., Cesevičienė, J., Amalevičiūtė K., Features of Carbon Stock in Biomass of Indsutrial Hemp and Stinging Nettle, in: Sayigh, A. (Ed.), Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I, Selected Topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014, Springer, Brighton, 2015, pp. 17−30.
33. Campbell, B.J., Berrada, A.F., Hudalla, C., Amaducci, S., McKay, J.K., 2019. Genotype × Environment Interactions of Industrial Hemp Cultivars Highlight Diverse Responses to Environmental Factors. Agrosystems, Geosciences and Environment 2, 1–11. https://doi.org/10.2134/age2018.11.0057.
34. Campiglia, E., Gobbi, L., Marucci, A., Rapa, M., Ruggieri, R., Vinci, G., 2020. Hemp seed production: Environmental impacts of *Cannabis sativa* L. agronomic practices by life cycle assessment (LCA) and carbon footprint methodologies. Sustainability (Switzerland) 12. https://doi.org/10.3390/su12166570.
35. Campiglia, E., Radicetti, E., Mancinelli, R., 2017. Plant density and nitrogen fertilization affect agronomic performance of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) in Mediterranean environment. Industrial Crops and Products 100, 246–254. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.022.
36. Cardarelli, A., Cucina, M., Agresti, G., Nicolini, A., Cavalaglio, G., Barbanera, M., 2025. Optimizing co-hydrothermal carbonization of organic dairy manure and hemp stalks: a multi-criteria decision-making approach. Energy Nexus 20. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100533.

37. Cavalaglio, G., Cotana, F., Nicolini, A., Coccia, V., Petrozzi, A., Formica, A., Bertini, A., 2020. Characterization of various biomass feedstock suitable for small-scale energy plants as preliminary activity of biocheaper project. Sustainability (Switzerland) 12. https://doi.org/10.3390/su12166678.
38. Chaowana, P., Hnoocham, W., Chaiprapat, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Chaisan, T., Paopun, Y., Pisutpiched, S., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., 2024. Utilization of hemp stalk as a potential resource for bioenergy. Materials Science for Energy Technologies 7, 19–28. https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.07.001.
39. Chen, C., Wongso, I., Putnam, D., Khir, R., Pan, Z., 2021. Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). Ind. Crops Prod. 172, 114051. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051.
40. Chen, X., Wu, R., Sun, Y., Jian, X., 2022. Synergistic Effects on the Co-pyrolysis of Agricultural Wastes and Sewage Sludge at Various Ratios. ACS Omega 7, 1264–1272. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05884.
41. Chiang, K.Y., Chien, K.L., Lu, C.H., 2012. Characterization and comparison of biomass produced from various sources: Suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. Appl Energy 100, 164–171. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.063.
42. Chiluwal, A., Sandhu, S.S., Sandhu, H., Irey, M., Johns, F., Sanchez, R., 2023. Cannabidiol industrial hemp growth, biomass, and temporal cannabinoids accumulation under different planting dates in southern Florida. Agrosystems, Geosciences and Environment 6. https://doi.org/10.1002/agg2.20347.
43. Christaki, S., Bouloumpasi, E., Lalidou, E., Chatzopoulou, P., Irakli, M., 2022. Bioactive profile of distilled solid by-products of rosemary, Greek sage and spearmint as affected by distillation methods. Molecules 27. https://doi.org/10.3390/ molecules27249058.
44. Czekała, W., Nowak, M., Bojarski, W., 2023. Characteristics of substrates used for biogas production in terms of water content. Fermentation. https://doi.org/10.3390/fermentation9050449.
45. Dahal, R.K., Acharya, B., Dutta, A., 2023. Thermal Response of Biocarbon-Filled Hemp Fiber-Reinforced Bioepoxy Composites. ACS Omega 8, 15422–15440. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00700.

46. Das, L., Li, W., Dodge, L.A., Stevens, J.C., Williams, D.W., Hu, H., Li, C., Ray, A.E., Shi, J., 2020. Comparative Evaluation of Industrial Hemp Cultivars: Agronomical Practices, Feedstock Characterization, and Potential for Biofuels and Bioproducts. ACS Sustain. Chem. Eng. 8, 6200–6210. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06145.
47. Das, L., Liu, E., Saeed, A., Williams, D.W., Hu, H., Li, C., Ray, A.E., Shi, J., 2017. Industrial hemp as a potential bioenergy crop in comparison with kenaf, switchgrass and biomass sorghum. Bioresource Technology 244, 641–649. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.008.
48. de Elguea-Culebras, G.O., Bravo, E.M., Sánchez-Vioque, R., 2022. Potential sources and methodologies for the recovery of phenolic compounds from distillation residues of Mediterranean aromatic plants. An approach to the valuation of by-products of the essential oil market – a review. Industrial Crops and Products 175, 114261. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114261.
49. de Holanda Pasolini, V., Lima, R.M., Costa, A.B.S., de Sousa, R.C., 2024. Drying of poultry manure for biomass applications in the combustion. Biomass Convers Biorefin 14, 17543–17553. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04001-6.
50. de Melo, M.M.R., Águas, F., Nascimento, J., 2023. Tray drying of medical cannabis inflorescences at industrial scale: Kinetics measurement and modeling towards the implementation of statistical process control. Ind. Crops Prod. 201, 116968. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116968.
51. De Vos, B., De Souza, M.F., Michels, E., Meers, E., 2023. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) field cultivation in a phytoattenuation strategy and valorization potential of the fibers for textile production. Environmental Science and Pollution Research 30, 41665–41681. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25198-z.
52. Demirbas, A., 2002. Relationships between Heating Value and Lignin, Moisture, Ash and Extractive Contents of Biomass Fuels. Energy Exploration & Exploitation 20, 1. https://doi.org/10.1260/014459802760170420.
53. Deng, G., Du, G., Yang, Y., Bao, Y., Liu, F., 2019. Planting Density and Fertilization Evidently Influence the Fiber Yield of Hemp (*Cannabis sativa* L.). Agronomy 9. https://doi.org/10.3390/agronomy9070368.
54. Deshmukh, Y., Yadav, V., Nigam, N., Yadav, A., Khare, P., 2015. Quality of bio-oil by pyrolysis of distilled spent of *cymbopogon flexuosus*. J. Anal. Appl. Pyrolysis 115, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.07.003.

55. Domingos, I., Ayata, U., Ferreira, J., Cruz-Lopes, L., Sen, A., Sahin, S., Esteves, B., 2020. Calorific power improvement of wood by heat treatment and its relation to chemical composition. Energies (Basel) 13. https://doi.org/10.3390/en13205322.
56. Dreger, M., Szalata, M., Górska-Paukszta, M., Mańkowska, G., Oleszak, G., Kwiatkowska, E., Ożarowski, M., 2023. Content of cannabinoids in clonally propagated industrial hemp. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2245968.
57. Dubis, B., Jankowski, K.J., Załuski, D., Sokólski, M., 2020. The effect of sewage sludge fertilization on the biomass yield of giant miscanthus and the energy balance of the production process. Energy 206, 118189. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118189.
58. Dubis, B., Szatkowski, A., Jankowski, K.J., 2022. Sewage sludge, digestate, and mineral fertilizer application affects the yield and energy balance of Amur silvergrass. Ind Crops Prod 175, 114235. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114235.
59. Dudziec, P., Stachowicz, P., Stolarski, M.J., 2023. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. Renew Energy 202, 822–833. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.002.
60. Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2024. Industrial hemp as a multi-purpose crop: last achievements and research in 2018−2023. Journal of Natural Fibers. https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2369186.
61. Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Industrial Crops and Products 235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800.
62. Enarevba, D.R., Haapala, K.R., 2024. The Emerging Hemp Industry: A Review of Industrial Hemp Materials and Product Manufacturing. AgriEngineering. https://doi.org/10.3390/agriengineering6030167.
63. Esteves, B., Sen, U., Pereira, H., 2023. Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis. Energies (Basel). https://doi.org/10.3390/en16104226.
64. Faux, A.M., Draye, X., Flamand, M.C., Occre, A., Bertin, P., 2016. Identification of QTLs for sex expression in dioecious and monoecious hemp (*Cannabis sativa* L.). Euphytica 209, 357–376. https://doi.org/10.1007/s10681-016-1641-2.

65. Felten, D., Fröba, N., Fries, J., Emmerling, C., 2013. Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (Miscanthus, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. Renew Energy 55, 160–174. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.004.
66. Fidan, H., Stankov, S., Petkova, N., Bozadziev, B., Dimov, M., Lazarov, L., Simitchiev, A., Stoyanova, A., 2021. Bio-energy characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.) hydrodistillation waste products. Journal of Energy Systems. https://doi.org/10.30521/jes.962474.
67. Fike, J., 2016. Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop. CRC. Crit. Rev. Plant Sci. 35, 406–424. https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1257842.
68. Finnan, J., Styles, D., 2013. Hemp: A more sustainable annual energy crop for climate and energy policy. Energy Policy 58, 152–162. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.046.
69. Frankowski, J., Sieracka, D., 2021. Possibilities for Using Waste Hemp Straw for Solid Biofuel Production. MDPI AG, p. 18. https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009018.
70. Frusciante, L., Geminiani, M., Shabab, B., Olmastroni, T., Roncucci, N., Mastroeni, P., Salvini, L., Lamponi, S., Trezza, A., Santucci, A., 2025. Enhancing Industrial Hemp (*Cannabis sativa*) Leaf By-Products: Bioactive Compounds, Anti-Inflammatory Properties, and Potential Health Applications. International Journal of Molecular Sciences 26. https://doi.org/10.3390/ijms26020548.
71. Gajera, B., Tyagi, U., Sarma, A.K., Jha, M.K., 2023. Pyrolysis of cattle manure: kinetics and thermodynamic analysis using TGA and artificial neural network. Biomass Convers Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04476-3.
72. Gani, A., Erdiwansyah, Desvita, H., Munawar, E., Mamat, R., Nizar, M., Darnas, Y., Sarjono, R.E., 2024. Comparative analysis of HHV and LHV values of biocoke fuel from palm oil mill solid waste. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100581.
73. Gehrmann, H.J., Mätzing, H., Nowak, P., Baris, D., Seifert, H., Dupont, C., Defoort, F., Peyrot, M., Castagno, F., 2020. Waste wood characterization and combustion behaviour in pilot lab scale. Journal of the Energy Institute. https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.02.001.
74. Ghiasi, M.M., Mohammadzadeh, O., Zendehboudi, S., Fgaier, H., 2024. Effective approach to assess higher heating value of biomass from ultimate and proximate

analysis. Canadian Journal of Chemical Engineering. https://doi.org/10.1002/cjce.25287.

75. Ghodake, G.S., Shinde, S.K., Kadam, A.A., Saratale, R.G., Saratale, G.D., Kumar, M., Palem, R.R., AL-Shwaiman, H.A., Elgorban, A.M., Syed, A., Kim, D.Y., 2021. Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. J Clean Prod. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645.
76. Giannoulis, K.D., Bartzialis, D., Gintsioudis, I., Danalatos, N.G., 2024. Cultivation Practices Affect Biomass Yield and Quality of "Felina 32", an Industrial Hemp Variety. Agronomy 14. https://doi.org/10.3390/agronomy14112743.
77. Gill, A.R., Loveys, B.R., Cavagnaro, T.R., Burton, R.A., 2023. The potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) as an emerging drought resistant fibre crop. Plant Soil. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06219-9.
78. Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I.A., Rosenqvist, H., Svensson, S.E., Lantz, M., Mattsson, J.E., Börjesson, P., Björnsson, L., 2014. Comparing energy crops for biogas production - Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. Biomass Bioenergy 64, 199–210. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061.
79. Gitsopoulos, T., Tsaliki, E., Korres, N.E., Georgoulas, I., Panoras, I., Botsoglou, D., Vazanelli, E., Fifis, K., Zisis, K., 2024. Response of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) to Herbicides and Weed Control. International Journal of Plant Biology 15, 281–292. https://doi.org/10.3390/ijpb15020024.
80. Güleç, F., Pekaslan, D., Williams, O., Lester, E., 2022. Predictability of higher heating value of biomass feedstocks via proximate and ultimate analyses – A comprehensive study of artificial neural network applications. Fuel 320. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123944.
81. Hammami, N., Privé, J.-P., Moreau, G., 2022. Spatiotemporal variability and sensitivity of industrial hemp cultivars under variable field conditions. European Journal of Agronomy 138, 126549. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126549.
82. Heard, J., Watson, K., Kostiuk, J., 2007. Nutrient Uptake and Partitioning by Industrial Hemp Dry matter (DM) accumulation Influence of retting on nutrient removal Acknowledgements, The ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings (November 4−8, 2007).

83. Heinz, A., Kaltschmitt, M., St Ulpnagel, R., Scheeer, K., 2001. Comparison of moist vs. air-dry biomass provision chains for energy generation from annual crops, Biomass and Bioenergy.
84. Ingrao, C., Novelli, V., Valenti, F., Messineo, A., Arcidiacono, C., Huisingh, D., 2021. Feasibility of usage of hemp as a feedstock for anaerobic digestion: Findings from a literature review of the relevant technological and energy dimensions. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 51, 1129–1158. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1745036.
85. Iqbal, Y., Gauder, M., Claupein, W., Graeff-Hönninger, S., Lewandowski, I., 2015. Yield and quality development comparison between miscanthus and switchgrass over a period of 10 years. Energy 89, 268–276. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.134
86. Islam, M.M., Rengel, Z., Storer, P., Siddique, K.H.M., Solaiman, Z.M., 2023. Microbial consortium inoculant and rock mineral fertiliser differentially improved yield and nutrient uptake of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties. Industrial Crops and Products 197, 116599. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116599.
87. Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., 2015. Screening of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Cultivars for Biomass Yielding Capacities in Lithuania. Journal of Natural Fibers 12, 368–377. https://doi.org/10.1080/15440478.2014.929556.
88. Jankowski, K.J., Dubis, B., Budzyński, W.S., Bórawski, P., Bułkowska, K., 2016. Energy efficiency of crops grown for biogas production in a large-scale farm in Poland. Energy 109, 277–286. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.087.
89. Jankowski, K.J., Dubis, B., Kozak, M., 2021. Sewage sludge and the energy balance of Jerusalem artichoke production - A case study in north-eastern Poland. Energy 236. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121545.
90. Jankowski, K.J., Dubis, B., Sokólski, M.M., Załuski, D., Bórawski, P., Szempliński, W., 2020. Productivity and energy balance of maize and sorghum grown for biogas in a large-area farm in Poland: An 11-year field experiment. Ind Crops Prod 148. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112326.
91. Jankowski, K.J., Kołodziej, B., Dubis, B., Sugier, D., Antonkiewicz, J., Szatkowski, A., 2023. The effect of sewage sludge on the energy balance of cup plant biomass production. A six-year field experiment in Poland. Energy 276, 127478. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127478.

92. Jasinskas, A., Streikus, D., Vonžodas, T., 2020. Fibrous hemp (Felina 32, USO 31, Finola) and fibrous nettle processing and usage of pressed biofuel for energy purposes. Renew. Energy 149, 11–21. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.007.
93. Jha, S., Pattnaik, F., Nanda, S., Zapata, O., Acharya, B., Dalai, A.K., 2024. Investigations of thermal effects during pyrolysis of agro-forestry biomass and physicochemical characterizations of biofuel products. Biocatal. Agric. Biotechnol. 61. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103379.
94. Ji, A., Jia, L., Kumar, D., Yoo, C.G., 2021. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products. Fermentation. https://doi.org/10.3390/fermentation7010006.
95. Kanchanatip, E., Prasertsung, N., Thasnas, N., Grisdanurak, N., Wantala, K., 2023. Valorization of cannabis waste via hydrothermal carbonization: solid fuel production and characterization. Environmental Science and Pollution Research 30, 90318–90327. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24123-0.
96. Kasinath, A., Bharathiraja, B., Jambulingam, R., Iyyappan, J., Al-Muhtaseb, A.H., 2021. Techno-economic assessment of a hybrid biorefinery platform for the production of xylo-oligosaccharides and bioethanol from rice straw. Fuel 287, 119481. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119481.
97. Kaur, N., Griffin, W., Sandhu, A., Sidhu, S., Brym, Z., Sharma, L., 2024. Nitrogen application and cultivar effects on industrial hemp yield dynamics. Agronomy Journal 116, 727–736. https://doi.org/10.1002/agj2.21537.
98. Kazimierski, P., Januszewicz, K., Godlewski, W., Fijuk, A., Suchocki, T., Chaja, P., Barczak, B., Kardaś, D., 2022. The course and the effects of agricultural biomass pyrolysis in the production of high-calorific biochar. Materials 15. https://doi.org/10.3390/ma15031038.
99. Kebede, T., Berhe, D.T., Zergaw, Y., 2022. Combustion characteristics of briquette fuel produced from biomass residues and binding materials. Journal of Energy 2022, 1–10. https://doi.org/10.1155/2022/4222205.
100. Keiller, B.G., Potter, M., Burton, R.A., van Eyk, P.J., 2021. Elucidating the degradation reaction pathways for the hydrothermal carbonisation of hemp via biochemical compositional analysis. Fuel 294. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120450.

101. Khuenkaeo, N., Tippayawong, N., 2019. Production and characterization of bio-oil and biochar from ablative pyrolysis of lignocellulosic biomass residues. Chem. Eng. Commun. 207, 153-160. https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1574769.
102. Kiesse, T. Senga, Ventura, A., van der Werf, H.M.G., Cazacliu, B., Idir, R., Andrianandraina, 2017. Introducing economic actors and their possibilities for action in LCA using sensitivity analysis: Application to hemp-based insulation products for building applications. Journal of Cleaner Production 142, 3905–3916. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.069.
103. Kolarikova, M., Havrland, B., Ivanova, T., 2013. Energy Balance of Hemp (*Cannabis sativa* L.) Grown for Energy Purposes. Agricultura tropica et subtropica 46, 10–15. https://doi.org/10.2478/ats-2013-0002.
104. Kolarikova, M., Ivanova, T., Havrland, B., Amonov, K., 2014. Evaluation of sustainability aspect-energy balance of briquettes made of hemp biomass cultivated in Moldova, Agronomy Research.
105. Kołodziej, J., Pudełko, K., Mańkowski, J., 2023. Energy and Biomass Yield of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) as Influenced by Seeding Rate and Harvest Time in Polish Agro-Climatic Conditions. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159609.
106. Kraszkiewicz, A., Kachel, M., Parafiniuk, S., Zajac, G., Niedziółka, I., Sprawka, M., 2019. Assessment of the possibility of using hemp biomass (*Cannabis sativa* L.) for energy purposes: A case study. Applied Sciences (Switzerland) 9. https://doi.org/10.3390/app9204437.
107. Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S.E., Englund, J.E., Björnsson, L., 2011a. Anaerobic digestion of industrial hemp-Effect of harvest time on methane energy yield per hectare. Biomass Bioenergy 35, 893–900. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005.
108. Kreuger, Emma, Sipos, B., Zacchi, G., Svensson, S.E., Björnsson, L., 2011b. Bioconversion of industrial hemp to ethanol and methane: The benefits of steam pretreatment and co-production. Bioresour Technol 102, 3457–3465. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.126.
109. Król, D., Motyl, P., Poskrobko, S., 2022. Chlorine corrosion in a low-power boiler fired with agricultural biomass. Energies (Basel) 15. https://doi.org/10.3390/en15010382.

110. Kumar, I., Kumar, U., Singh, P.K., Singh, R.P., Madheshiya, P., Kharwar, S., 2024. Utilizing residual biomass from medicinal and aromatic plants: scope for value enhancement. In: Kumar, L., Bharadvaja, N., Singh, R., Anand, R. (Eds.), Medicinal and aromatic plants: current research status, value-addition to their waste, and agro- industrial potential (Vol II). Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 185–202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64601-0_13.
111. Kwiatkowski, J., Graban, Ł., Stolarski, M.J., 2023. The energy efficiency of Virginia fanpetals biomass production for solid biofuel. Energy 264. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126180.
112. Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.E., 2018. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. Waste Biomass Valorization 9, 1095–1112. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z.
113. Leoni, M., Musio, S., Croci, M., Tang, K., Magagnini, G.M., Thouminot, C., Müssig, J., Amaducci, S., 2022. The effect of agronomic management of hemp (*Cannabis sativa* L.) on stem processing and fibre quality. Industrial Crops and Products 188, 115520. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115520.
114. Li J., Hao X., Shen Z., Wu Y., van Loosdrecht M.C.M., 2023. Low-temperature drying of waste activated sludge enhanced by agricultural biomass towards self-supporting incineration. Science of The Total Environment 888, 164200. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164200.
115. Li, Z., Lu, H., Ren, L., He, L., 2013. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. Chemosphere 93, 1247–1257. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.064.
116. Lisý, M., Lisá, H., Jecha, D., Baláš, M., Križan, P., 2020. Characteristic properties of alternative biomass fuels. Energies (Basel) 13. https://doi.org/10.3390/en13061448.
117. Liu, J., Guan, Z., Li, Z., 2018. Application of cryogenic and mechanical treatment in degumming of hemp stems. Biosyst. Eng. 174, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.007.
118. Liu, M., Fernando, D., Daniel, G., Madsen, B., Meyer, A.S., Ale, M.T., Thygesen, A., 2015. Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. Ind. Crops Prod. 69, 29–39. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.010.

119. Luca, S.V., Wojtanowski, K., Korona-Głowniak, I., Skalicka-Woźniak, K., Minceva, M., Trifan, A., 2024. Spent material extractives from hemp hydrodistillation as an underexplored source of antimicrobial cannabinoids. Antibiotics 13. https://doi.org/10.3390/antibiotics13060485.
120. Madhu, P., Sowmya Dhanalakshmi, C., Mathew, M., 2020. Multi-criteria decision-making in the selection of a suitable biomass material for maximum bio-oil yield during pyrolysis. Fuel 277. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118109.
121. Mahou, Y., Marrakchi Ben Jaafar, D., Al Moudani, N., Jeddi, M., Chda, A., Fettoukh, N., Benbrahim, K.F., Aarab, L., El Bouri, A., Stambouli, H., Bencheikh, R., 2025. Chemical profile and bioactive properties of *Cannabis sativa* threshing residue: Vasorelaxant, antioxidant, immunomodulatory, and antibacterial activities. Journal of HerbMed Pharmacology 14, 29–42. https://doi.org/10.34172/jhp.2025.51481.
122. Maj, I., Kalisz, S., Szymajda, A., Łaska, G., Gołombek, K., 2021. The influence of cow dung and mixed straw ashes on steel corrosion. Renew Energy 177, 1198–1211. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.019.
123. Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A.C., Sousa, A.M.O., 2019. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022.
124. Marcelino, S., Gaspar, P.D., Paço, A., 2023. Sustainable waste management in the production of medicinal and aromatic plants—a systematic review. Sustain. (Switz.). https://doi.org/10.3390/su151813333.
125. Mari Selvam, S., Balasubramanian, P., 2023. Influence of biomass composition and microwave pyrolysis conditions on biochar yield and its properties: a machine learning approach. Bioenergy Res 16, 138–150. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10447-9.
126. Marin-Batista, J.D., Villamil, J.A., Qaramaleki, S. V., Coronella, C.J., Mohedano, A.F., Rubia, M.A. de la, 2020. Energy valorization of cow manure by hydrothermal carbonization and anaerobic digestion. Renew Energy 160, 623–632. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.003.
127. Marrot, L., Candelier, K., Valette, J., Lanvin, C., Horvat, B., Legan, L., DeVallance, D.B., 2022. Valorization of Hemp Stalk Waste Through Thermochemical

Conversion for Energy and Electrical Applications. Waste Biomass Valorization 13, 2267–2285. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01640-6.

128. Matassa, S., Esposito, G., Pirozzi, F., Papirio, S., 2020. Exploring the biomethane potential of different industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) biomass residues. Energies (Basel). 13. https://doi.org/10.3390/en13133361.
129. Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., Soldati, A., 1998. Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.), SOURCE: JOURNAL OF THE INTERNATIONAL HEMP ASSOCIATION.
130. Menghini, L., Ferrante, C., Carradori, S., D'antonio, M., Orlando, G., Cairone, F., Cesa, S., Filippi, A., Fraschetti, C., Zengin, G., Ak, G., Tacchini, M., Iqbal, K., 2021. Chemical and bioinformatics analyses of the anti-leishmanial and anti-oxidant activities of hemp essential oil. Biomolecules 11, 1–17. https://doi.org/10.3390/biom11020272.
131. Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Azarbaijani, R., Parsa Yeganeh, L., Angelidaki, I., Nizami, A.S., Bhat, R., Dashora, K., Vijay, V.K., Aghbashlo, M., Gupta, V.K., Tabatabaei, M., 2021. Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: A review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity. Renewable and Sustainable Energy Reviews 135. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110173.
132. Mishchenko, S., Mokher, J., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., Dudukova, S., n.d. Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): codification and description according to the BBCH scale.
133. Mrosso, R., Mecha, A.C., Kiplagat, J., 2023. Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: Effect of parameters. Heliyon 9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16360.
134. Munawar, M.A., Khoja, A.H., Naqvi, S.R., Mehran, M.T., Hassan, M., Liaquat, R., Dawood, U.F., 2021. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111451.
135. Müssig, J., Beaugrand, J., 2025. Decortication and separation of wet or dry hemp stems - What difference does it make? Ind. Crops Prod. 223. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119965.
136. Muylle, H., van Hulle, S., de Vliegher, A., Baert, J., van Bockstaele, E., Roldán-Ruiz, I., 2015. Yield and energy balance of annual and perennial lignocellulosic

crops for bio-refinery use: A 4-year field experiment in Belgium. European Journal of Agronomy 63, 62–70. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.001.

137. Nair, G.R., Lyew, D., Yaylayan, V., Raghavan, V., 2015. Application of microwave energy in degumming of hemp stems for the processing of fibres. Biosyst. Eng. 131, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.012.
138. Nazari, F., Woods, L.D., 2025. Environmental life cycle assessment of hemp-based thermal insulation: From agricultural growth to manufacturing in the United States. Journal of Cleaner Production 506, 145509. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145509.
139. Neeft J, Gagnepain B, Bacovsky D, Lauranson R, Georgakopoulos K, Fehrenback H, et al. Harmonized calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe, Netherlands. 2011 BioGrace standard values – version 4 – Public.xls, www.BioGrace.net.
140. Nielsen, K., Roß, C.L., Hoffmann, M., Muskolus, A., Ellmer, F., Kautz, T., 2020. The chemical composition of biogas digestates determines their effect on soil microbial activity. Agriculture (Switzerland) 10. https://doi.org/10.3390/agriculture10060244.
141. Nivash, V., Sakthivadivel, D., 2024. Characterization and thermo-chemical conversion of invasive biomass by varying gasifying agents for hydrogen rich producer gas using ASPEN Plus. Biomass Convers Biorefin 14, 15969–15987. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03654-z.
142. Ogwang, I., Kasedde, H., Nabuuma, B., Kirabira, J.B., Lwanyaga, J.D., 2021. Characterization of biogas digestate for solid biofuel production in Uganda. Sci Afr 12. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00735.
143. ÖzyuğUran, A., Yaman, S., 2017. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis, in: Energy Procedia. Elsevier Ltd, pp. 130–136. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149.
144. Pan, J., Xu, G., Liang, M., Mo, H., Luo, D., Wang, C., Ullah, R., Li, Y., Liao, C., Wei, X., Chen, P., 2025. Kenaf biochar enhances heavy metal phytostabilization and growth of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) using multi-metal contaminated mining site soils. Plant Physiology and Biochemistry 229. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110312.
145. Pavlovic, R., Panseri, S., Giupponi, L., Leoni, V., Citti, C., Cattaneo, C., Cavaletto, M., Giorgi, A., 2019. Phytochemical and Ecological Analysis of Two Varieties of

Hemp (*Cannabis sativa* L.) Grown in a Mountain Environment of Italian Alps. Front. Plant Sci. 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01265.

146. Petit, J., Monfort, A., Argyris, J., 2025. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Breeding. In: Salem, K.Ś.M., Al-Khayri, J.M., Jain, S.M. (Eds.), Breeding and Biotechnology of Grass and Bast Fiber Crops, Advances in Plant Breeding Strategies 12. Springer, Cham, pp. 507–562.
147. Pieracci, Y., Ascrizzi, R., Terreni, V., Pistelli, L., Flamini, G., Bassolino, L., Fulvio, F., Montanari, M., Paris, R., 2021. Essential oil of *Cannabis sativa* L: Comparison of yield and chemical composition of 11 hemp genotypes. Molecules 26. https://doi.org/10.3390/molecules26134080.
148. Pieracci, Y., Fulvio, F., Isca, V., Pistelli, L., Bassolino, L., Montanari, M., Moschella, A., Flamini, G., Paris, R., 2023. The phenological stage of hemp inflorescences affects essential oil yield and its chemical composition. Ind. Crops Prod. 197. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116605.
149. Pisanó, I., Gottumukkala, L., Hayes, D.J., Leahy, J.J., 2021. Characterisation of Italian and Dutch forestry and agricultural residues for the applicability in the bio-based sector. Ind Crops Prod 171. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113857.
150. Prade, T., Svensson, S.-E., Andersson, A., Mattsson, J.E., 2011. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. Biomass and Bioenergy 35, 3040–3049. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.006.
151. Prade, T., Svensson, S.-E., Mattsson, J.E., 2012. Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. Biomass and Bioenergy 40, 36–52. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.045.
152. Punja, Z.K., Sutton, D.B., Kim, T., 2023. Glandular trichome development, morphology, and maturation are influenced by plant age and genotype in high THC-containing cannabis (*Cannabis sativa* L.) inflorescences. J. Cannabis Res. 5. https://doi.org/10.1186/s42238-023-00178-9.
153. Puri, L., Hu, Y., Naterer, G., 2024. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. Frontiers in Fuels 2. https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361.
154. Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J.D., Sofan-German, S., Mendoza, J.M., Bula-Silvera, A., 2024. Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. Results Chem. 12, 101886. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886.

155. Rahemi, A., Dhakal, R., Temu, V.W., Rutto, L., Kering, M.K., 2021. Performance of different-use type industrial hemp cultivars under mid-atlantic region conditions. Agronomy 11. https://doi.org/10.3390/agronomy11112321.
156. Rahman, M.H.A., Sadi, T., Ahmad, A.A., Masri, I.N., Yusoff, M.M., Kamaruddin, H., Shakri, N.A., Hamid, M.A.A., Malek, R.A., 2020. Inventory and composting of yard waste in Serdang, Selangor, Malaysia. Heliyon 6, e04486. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04486.
157. Recio-Ruiz, M. del C., Ruiz-Rosas, R., García-Mateos, F.J., Valero-Romero, M.J., Rosas, J.M., Rodríguez-Mirasol, J., Cordero, T., 2025. An integrated approach to the valorization of pyrolysis products from lignocellulosic residues and by-products. Biomass Bioenergy 196. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107676.
158. Rehman, K. ur, Cai, M., Xiao, X., Zheng, L., Wang, H., Soomro, A.A., Zhou, Y., Li, W., Yu, Z., Zhang, J., 2017. Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (Hermetia illucens L.). J Environ Manage 196, 458–465. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.047.
159. Rehman, M., Fahad, S., Du, G., Cheng, X., Yang, Y., Tang, K., Liu, L., Liu, F.-H., Deng, G., 2021. Evaluation of hemp (*Cannabis sativa* L.) as an industrial crop: a review. Environmental Science and Pollution Research 28, 52832–52843. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16264-5.
160. Reinhardt, J., Hilgert, P., von Cossel, M., 2022. Yield performance of dedicated industrial crops on low-temperature characterized marginal agricultural land in Europe – a review. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. https://doi.org/10.1002/bbb.2314.
161. Roman, K., Grzegorzewska, E., 2024. The Comparison of Physical and Chemical Properties of Pellets and Briquettes from Hemp (*Cannabis sativa* L.). Energies (Basel). 17. https://doi.org/10.3390/en17092210.
162. Romaneckas, K., Švereikaitė, A., Kimbirauskienė, R., Sinkevičienė, A., Balandaitė, J., 2023. The Energy and Environmental Evaluation of Maize, Hemp and Faba Bean Multi-Crops. Agronomy 13. https://doi.org/10.3390/agronomy13092316.
163. Ruzgas, R., Tilvikienė, V., Barčauskaitė, K., Viršilė, A., Žydelis, R., 2024. Ethephon's effects on sexual expression and cannabinoid production in monoecious

and dioecious varieties of hemp (*Cannabis sativa* L.): A field trial. Ind. Crops Prod. 210, 118064. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118064.

164. Sahoo, S.S., Vijay, V.K., Chandra, R., Kumar, H., 2021. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. Clean. Eng. Technol. 3, 100101. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101.
165. Saleh, S.B., Flensborg, J.P., Shoulaifar, T.K., Sárossy, Z., Hansen, B.B., Egsgaard, H., Demartini, N., Jensen, P.A., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., 2014. Release of chlorine and sulfur during biomass torrefaction and pyrolysis. Energy and Fuels 28, 3738–3746. https://doi.org/10.1021/ef4021262.
166. Saloner, A., Bernstein, N., 2023. Dynamics of Mineral Uptake and Plant Function during Development of Drug-Type Medical Cannabis Plants. Agronomy 13. https://doi.org/10.3390/agronomy13122865.
167. Saragoça, A., Manuelito, C., Gallego, J.C.A., Lobón, N.C., Garrido, A.O., Cordeiro, A.I., 2026. Phenological Development and Growth Responses of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) to Sowing Dates and Climatic Conditions in Elvas, Portugal. Agronomy 16. https://doi.org/10.3390/agronomy16020271.
168. Scordia, D., Papazoglou, E.G., Kotoula, D., Sanz, M., Ciria, C.S., Pérez, J., Maliarenko, O., Prysiazhniuk, O., von Cossel, M., Greiner, B.E., Lazdina, D., Makovs.kis, K., Lamy, I., Ciadamidaro, L., Petit-dit-Grezeriat, L., Corinzia, S.A., Fernando, A.L., Alexopoulou, E., Cosentino, S.L., 2022. Towards identifying industrial crop types and associated agronomies to improve biomass production from marginal lands in Europe. GCB Bioenergy 14, 710–734. https://doi.org/10.1111/gcbb.12935.
169. Siaudinis G, Karcauskiene D. The effect of sewage sludge on and cup plant's (*Silphium perfoliatum* L.) biomass productivity under Western Lithuania's retisol. Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development. Bioeconomy challenges 2017:148–52. https://doi.org/10.15544/RD.2017.027.
170. Siaudinis, G., Jasinskas, A., Šlepetienė, A., Karčauskienė, D., 2012. The evaluation of biomass and energy productivity of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) in Albeluvisol 99, 357–362.
171. Sieracka, D., Frankowski, J., Wacławek, S., Czekała, W., 2023. Hemp Biomass as a Raw Material for Sustainable Development. Applied Sciences (Switzerland). https://doi.org/10.3390/app13179733.

172. Sihlangu, E., Luseba, D., Regnier, T., Magama, P., Chiyanzu, I., Nephawe, K.A., 2024. Investigating methane, carbon dioxide, ammonia, and hydrogen sulphide content in agricultural waste during biogas production. Sustainability 16, 5145. https://doi.org/10.3390/su16125145.
173. Sitka, A., Szulc, P., Smykowski, D., Jodkowski, W., 2021. Application of poultry manure as an energy resource by its gasification in a prototype rotary counterflow gasifier. Renew Energy 175, 422–429. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.126.
174. Spampinato, G., Candeliere, F., Amaretti, A., Paris, R., Montanari, M., Virzì, N., Strani, L., Citti, C., Cannazza, G., Rossi, M., Raimondi, S., 2024. A three-years survey of microbial contaminants in industrial hemp inflorescences from two Italian cultivation sites. Journal of Cannabis Research 6. https://doi.org/10.1186/s42238-024-00241-z.
175. Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., Migut, D., 2024. Influence of Foliar Application of Microelements on Yield and Yield Components of Spring Malting Barley. Agriculture (Switzerland) 14. https://doi.org/10.3390/agriculture14030505.
176. Steffen, F., Requejo, A., Ewald, C., Janzon, R., Saake, B., 2016. Anaerobic digestion of fines from recovered paper processing – Influence of fiber source, lignin and ash content on biogas potential. Bioresour. Technol. 200, 506–513. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.014.
177. Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., Seshadri, S., 2016. Production, characterization and evaluation of biochar from pod (Pisum sativum), leaf (Brassica oleracea) and peel (Citrus sinensis) wastes. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 5, 43–53. https://doi.org/10.1007/s40093-016-0116-8.
178. Stolarski, M.J., Dudziec, P., Krzyżaniak, M., Graban, Ł., Lajszner, W., Olba–Zięty, E., 2024b. How do key for the bioenergy industry properties of baled biomass change over two years of storage? Renew Energy 224. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120236.
179. Stolarski, M.J., Dudziec, P., Olba-Zięty, E., Stachowicz, P., Krzyżaniak, M., 2022. Forest dendromass as energy feedstock: Diversity of properties and composition depending on systematic genus and organ. Energies (Basel). https://doi.org/10.3390/en15041442.

180. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., 2024a. Energy efficiency of *Silphium perfoliatum* and *Helianthus salicifolius* biomass production. Energy 307. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132592.
181. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., 2025. Energy efficiency of spring camelina production under an organic system in sole-cropping and intercropping cultivation. Ind Crops Prod 228. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120909.
182. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Tworkowski, J., Szczukowski, S., Niksa, D., 2016. Analysis of the energy efficiency of short rotation woody crops biomass as affected by different methods of soil enrichment. Energy 113, 748–761. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.098.
183. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworkowski, J., Szczukowski, S., Olba–Zięty, E., Gołaszewski, J., 2017. Energy efficiency of perennial herbaceous crops production depending on the type of digestate and mineral fertilizers. Energy 134, 50–60. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.195.
184. Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., 2020. Energy value of yield and biomass quality of poplar grown in two consecutive 4-year harvest rotations in the north-east of Poland. Energies (Basel) 13. https://doi.org/10.3390/en13061495.
185. Stolarski, M.J., Welenc, M., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., Wierzbicki, S., 2024d. Characteristics and changes in the properties of cereal and rapeseed straw used as energy feedstock. Energies (Basel) 17. https://doi.org/10.3390/en17051243.
186. Stolarski, M.J., Wojciechowska, N., Seliwiak, M., Dobrzański, T.K., 2024c. Properties of forest tree branches as an energy feedstock in north-eastern Poland. Energies (Basel) 17. https://doi.org/10.3390/en17081975.
187. Stramkale, V., Andze, L., Cernova, L., Teirumnieka, E., Filipova, I., Stramkalis, A., Teirumnieks, E., Andzs, M., 2024. Industrial Hemp Variety Performance in Latvia Under Baltic Sea Climate. Agronomy 14. https://doi.org/10.3390/agronomy14122750.
188. Strzelczyk, M., Chudy, M., Łochyńska, M., Gimbut, M., Krawczyk, K., 2023. Influence of Cultivar, Harvest Date, and Selected Weather Conditions on the Essential Oils Content in Inflorescences of Hemp *Cannabis sativa* L. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2163332.

189. Suárez-Rivero, D., Marín-Mahecha, O., Ortiz-Aguilar, J., Ballesteros-Rosero, L.C., Fuentes-Reinés, J.M., de Jesús Guzmán-Hernández, T., 2021. Estimation of fixed carbon by ignition of corn fruit residues treated with electromagnetic fields. Chem Eng Trans. https://doi.org/10.3303/CET2187083.
190. Sugier, P., Jaros-Tsoj, K., Jaroszuk-Ściseł, J., Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., Sugier, D., Sęczyk, Ł., Plak, A., Kowalski, R., Sikorska, A.D., Vangronsveld, J., Wójcik, M., 2025. Industrial hemp Futura 75 infructescence as a source of essential oils: Micromorphology, chemical profile, and yield of essential oils. Ind. Crops Prod. 234. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121527.
191. Sumardiono, S., Hawali Abdul Matin, H., Ivan Hartono, I., Choiruly, L., Budiyono, 2022. Biogas production from corn stalk as agricultural waste containing high cellulose material by anaerobic process. Mater Today Proc 63, S477–S483. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.135.
192. Sunoj Valiaparambil Sebastian, J., Dong, X., Trostle, C., Pham, H., Joshi, M.V., Jessup, R.W., Burow, M.D., Provin, T.L., 2023. Hemp Agronomy: Current Advances, Questions, Challenges, and Opportunities. Agronomy. https://doi.org/10.3390/agronomy13020475.
193. Szeptycki A, Wójcicki Z. Postęp technologiczny i nakłady energetyczne w rolnictwie do 2020 r.. 2003. Warszawa, IBMER.
194. Tajmirriahi, M., Momayez, F., Karimi, K., 2021. The critical impact of rice straw extractives on biogas and bioethanol production. Bioresour Technol 319. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124167.
195. Tamilselvan, R., Selwynraj, A.I., 2024. Visible light driven g-C3N4 photocatalytic pretreatment of rice straw for enhanced biogas production. Indian Journal of Chemical Technology 31, 762–769. https://doi.org/10.56042/ijct.v31i5.5886.
196. Tang, K., Struik, P.C., Yin, X., Calzolari, D., Musio, S., Thouminot, C., Bjelková, M., Stramkale, V., Magagnini, G., Amaducci, S., 2017. A comprehensive study of planting density and nitrogen fertilization effect on dual-purpose hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivation. Ind. Crops Prod. 107, 427–438. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.033.
197. Tang, K., Wang, J., Yang, Y., Deng, G., Yu, J., Hu, W., Guo, L., Du, G., Liu, F., 2022. Fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) yield and its response to fertilization and planting density in China. Ind Crops Prod 177, 114542. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114542.

198. Tang, Q., Chen, Y., Yang, H., Liu, M., Xiao, H., Wu, Z., Chen, H., Naqvi, S.R., 2020. Prediction of bio-oil yield and hydrogen contents based on machine learning method: Effect of biomass compositions and pyrolysis conditions. Energy and Fuels 34, 11050–11060. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01893.
199. Tang, X., Liu, Q., Zhong, W., Wang, T., 2024. Ash deposition characteristics during oxy- fuel combustion of biomass in a drop tube furnace. Biomass Convers Biorefin 14, 18499–18511. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04020-3.
200. Teirumnieka, E., Patel, N., Laktuka, K., Dolge, K., Veidenbergs, I., Blumberga, D., 2023. Sustainability dilemma of hemp utilization for energy production. Energy Nexus 11. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100213.
201. Teixeira, B.M.M., Oliveira, M., da Silva Borges, A.D., 2024. Coniferous biomass for energy valorization: A thermo-chemical properties analysis. Sustainability 16, 7622. https://doi.org/10.3390/su16177622.
202. Teleszko, M., Zając, A., Rusak, T., 2022. Hemp Seeds of the Polish 'Bialobrzeskie' and 'Henola' Varieties (*Cannabis sativa* L. var. *sativa*) as Prospective Plant Sources for Food Production. Molecules 27. https://doi.org/10.3390/molecules27041448.
203. Thakur, N., Salama, E.-S., Sharma, M., Sharma, P., Sharma, D., Li, X., 2022. Efficient utilization and management of seaweed biomass for biogas production. Materials Today Sustainability 18, 100120. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100120.
204. Thongplew, P., Kangsopa, J., Hermhuk, S., Tongkoom, K., Bhuyar, P., Insalud, N., 2025. Optimizing Ethephon Concentrations for Male Plant Feminization and Enhanced Seed Yield in Dioecious Thai Hemp (*Cannabis sativa* L. cv. RPF3). International Journal of Plant Biology 16. https://doi.org/10.3390/ijpb16030111.
205. Todde, G., Carboni, G., Marras, S., Caria, M., Sirca, C., 2022. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for phytoremediation: Energy and environmental life cycle assessment of using contaminated biomass as an energy resource. Sustainable Energy Technologies and Assessments 52. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102081.
206. Tsaliki, E., Kalivas, A., Jankauskiene, Z., Irakli, M., Cook, C., Grigoriadis, I., Panoras, I., Vasilakoglou, I., Dhima, K., 2021. Fibre and seed productivity of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties under Mediterranean conditions. Agronomy 11. https://doi.org/10.3390/agronomy11010171.

207. Väisänen, T., Kilpeläinen, P., Kitunen, V., Lappalainen, R., Tomppo, L., 2019. Effect of steam treatment on the chemical composition of hemp (*Cannabis sativa* L.) and identification of the extracted carbohydrates and other compounds. Ind. Crops Prod. 131, 224–233. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.055.
208. Vandepitte, K., Vasile, S., Vermeire, S., Vanderhoeven, M., Van der Borght, W., Latré, J., De Raeve, A., Troch, V., 2020. Hemp (*Cannabis sativa* L.) for high-value textile applications: The effective long fiber yield and quality of different hemp varieties, processed using industrial flax equipment. Industrial Crops and Products 158. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112969.
209. Varga, I., Markulj Kulundžić, A., Krolo, P., Iljkić, D., Tišma, M., Kraus, I., 2025. Industrial Hemp Finola Variety Photosynthetic, Morphometric, Biomechanical, and Yield Responses to K Fertilization Across Different Growth Stages. Agronomy 15. https://doi.org/10.3390/agronomy15020496.
210. Vávrová, K., Solcova, O., Knápek, J., Weger, J., Soukup, K., Humešová, T., Králík, T., Bím, J., 2022. Economic evaluation of Hemp's (*Cannabis sativa*) residual biomass for production of direct energy or biochar. Fuel 329, 125435. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125435.
211. Visković, J., Sikora, V., Latković, D., Zeremski, T., Dunđerski, D., Astatkie, T., Noller, J.S., Zheljazkov, V.D., 2024. Optimization of hemp production technology for fiber and seed. Ind. Crops Prod. 219, 119127. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119127.
212. Visković, J., Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Noller, J., Latković, D., Ocamb, C.M., Koren, A., 2023. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Agronomy and Utilization: A Review. Agronomy. https://doi.org/10.3390/agronomy13030931.
213. Viswanathan, M.B., Cheng, M.H., Clemente, T.E., Dweikat, I., Singh, V., 2021. Economic perspective of ethanol and biodiesel coproduction from industrial hemp. Journal of Cleaner Production 299. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126875.
214. Vuerich, M., Ferfuia, C., Zuliani, F., Piani, B., Sepulcri, A., Baldini, M., 2019. Yield and quality of essential oils in hemp varieties in different environments. Agronomy 9. https://doi.org/10.3390/agronomy9070356.
215. Wang, L., Tester, J.W., 2023. Role of biomass extractives in hydrothermal processing: Challenges and opportunities. Renew. Sustain. Energy Rev. 177, 113200. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113200.

216. Wang, T., Li, W., Wang, F., Li, J., Qin, J., Song, Z., Xu, J., Qiu, H., Cheng, Y., 2024. Biocontrol potential of *Bacillus velezensis* SEC-024A against southern blight of industrial hemp. Industrial Crops and Products 222, 119767. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119767.
217. Wawro, A., Gieparda, W., Bujnowicz, K., Rojewski, S., Praczyk, M., 2025. Influence of Yield Structure and Chemical Composition of Monoecious and Dioecious Hemp Forms on the Efficiency of Advanced Biofuels and Biocomposite Production. Journal of Natural Fibers 22. https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2585252.
218. Wei, X., Zhou, W., Long, S., Guo, Y., Qiu, C., Zhao, X., Wang, Y., 2023. Effects of Different N, P, and K Rates on the Growth and Cannabinoid Content of Industrial Hemp. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159605.
219. Williams, A., Brym, Z., Chen, C., Collins, A., Crawford, J., Darby, H., Dedecker, J., Ellison, S., Fike, J., Gage, K., Gang, D., Griffin, J., Johnson, B., Moore, V., Ortmeier-Clarke, H., Podder, S., Richmond, M., Roozeboom, K., Thelen, K., Werle, R., Pearce, R., 2025. Comparing agronomic performance of industrial hemp varieties for suitable production in the United States. Agron. J. 117. https://doi.org/10.1002/agj2.70006.
220. Yang, R., Yang, R., Berthold, E.C., McCurdy, C.R., Da Silva Benevenute, S., Brym, Z.T., Freeman, J.H., 2020. Development of Cannabinoids in Flowers of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.): A Pilot Study. Journal of Agricultural and Food Chemistry 68, 6058–6064. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01211.
221. Zhang, M., Anderson, S.L., Brym, Z.T., Pearson, B.J., 2021. Photoperiodic Flowering Response of Essential Oil, Grain, and Fiber Hemp (*Cannabis sativa* L.) Cultivars. Frontiers in Plant Science 12. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.694153.
222. Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Roozeboom, K., Wang, D., 2020a. Bioconversion of industrial hemp biomass for bioethanol production: A review. Fuel. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118725.
223. Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Wang, D., 2020b. High Ethanol Concentration (77 g/L) of Industrial Hemp Biomass Achieved through Optimizing the Relationship between Ethanol Yield/Concentration and Solid Loading. ACS Omega 5, 21913–21921. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03135.

224. Zheljazkov, V.D., Maggi, F., 2021. Valorization of CBD-hemp through distillation to provide essential oil and improved cannabinoids profile. Scientific Reports 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99335-4.
225. Zheljazkov, V.D., Semerdjieva, I., Sikora, V., Dincheva, I., Kačániová, M., 2025. Essential oils (EOs) composition and antimicrobial activities of novel *Cannabis sativa* L. (Hemp) selections from Serbia. Industrial Crops and Products 235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121615.
226. Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Dincheva, I., Kačániová, M., Astatkie, T., Semerdjieva, I.B., Latkovic, D., 2020a. Industrial, CBD, and wild hemp: How different are their essential oil profile and antimicrobial activity? Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25204631.
227. Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Semerdjieva, I.B., Kačániová, M., Astatkie, T., Dincheva, I., 2020b. Grinding and Fractionation during Distillation Alter Hemp Essential Oil Profile and Its Antimicrobial Activity. Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25173943.
228. Zvicevičius, E., Žiūra, K., Tilvikienė, V., Bakšinskaitė, A., 2024. Biomass Analysis of Industrial Hemp “Felina 32” and the Influence of plant height on its quality. Bioresources. https://doi.org/10.15376/biores.19.3.6380-6402.
229. Žydelis, R., Herbst, M., Weihermüller, L., Ruzgas, R., Volungevičius, J., Barčauskaitė, K., Tilvikienė, V., 2022. Yield potential and factor influencing yield gap in industrial hemp cultivation under nemoral climate conditions. European Journal of Agronomy 139, 126576. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126576.

7. Oświadczenia

Załącznik nr 2 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
(stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko
promotora/~~promotora pomocniczego~~*)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
promotora/~~promotora pomocniczego~~* rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Dudźca pod tytułem Produkcja i wielokierunkowe wykorzystanie konopi siewnych *Cannabis sativa* L. została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

.....
(podpis promotora)

* *niepotrzebne skreślić*

Załącznik nr 2 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

dr hab. inż. Kazimierz Warmiński, prof. UWM
(stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko
~~promotora~~/promotora pomocniczego*)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
~~promotora~~/promotora pomocniczego* rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Dudźca pod tytułem Produkcja i wielokierunkowe wykorzystanie konopi siewnych *Cannabis sativa* L. została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Kazimierz Warmiński
(podpis promotora)

* *niepotrzebne skreślić*

Załącznik nr 3 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

mgr inż. Paweł Dudziec
(imię i nazwisko kandydata)

rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
o samodzielnym napisaniu rozprawy doktorskiej

Świadoma(-y) odpowiedzialności prawnej oświadczam, że rozprawa doktorska pod tytułem Produkcja i wielokierunkowe wykorzystanie konopi siewnych *Cannabis sativa* L. została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona rozprawa nie jest i nie była wcześniej podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora.

Ponadto oświadczam, że treść rozprawy doktorskiej przedstawionej przez mnie do obrony, zawarta na przekazywanym nośniku elektronicznym, jest identyczna z jej wersją drukowaną.

W związku z powyższym oświadczam, że wyrażam zgodę na poddanie rozprawy doktorskiej procedurze antyplagiatowej.

Paweł T. Dudziec
(podpis kandydata)

Załącznik nr 4 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

mgr inż. Paweł Dudziec
(imię i nazwisko kandydata)
rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
autora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

Paweł Dudziec
(podpis kandydata)

Załącznik nr 4 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

mgr inż. Paweł Dudziec
(imię i nazwisko kandydata)
rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
autora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

Paweł Dudziec
(podpis kandydata)

Załącznik nr 4 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

mgr inż. Paweł Dudziec
(imię i nazwisko kandydata)
rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
autora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity (Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

Paweł Dudziec
(podpis kandydata)

Załącznik nr 4 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

mgr inż. Paweł Dudziec
(imię i nazwisko kandydata)
rolnictwo i ogrodnictwo
(dyscyplina naukowa)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
autora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

Paweł Dudziec
(podpis kandydata)

Załącznik nr 5 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

dr hab. inż. Kazimierz Warmiński, prof. UWM
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity (Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: walidacja wyników; analiza formalna; zapewnienie zasobów; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; finansowanie.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w pracy przez mgr inż. Pawła Dudźca jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr inż. Pawła Dudźca polegający na: opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

Kazimierz Warmiński
.....
podpis/podpisy

Załącznik nr 5 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: walidacja wyników; analiza formalna; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w pracy przez mgr inż. Pawła Dudźca jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr inż. Pawła Dudźca polegający na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

.....
podpis/podpisy

Załącznik nr 5 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: walidacja wyników; analiza formalna; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w pracy przez mgr inż. Pawła Dudźca jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr inż. Pawła Dudźca polegający na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

.....
podpis/podpisy

Załącznik nr 5 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity (Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: walidacja wyników; analiza formalna; zapewnienie zasobów; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; finansowanie.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w pracy przez mgr inż. Pawła Dudźca jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr inż. Pawła Dudźca polegający na: opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.

.....
podpis/podpisy

Załącznik nr 5 do Załącznika nr 1
do Uchwały Nr 362
Senatu Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
z dnia 27 czerwca 2023 roku
wprowadzającej procedurę postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora

Olsztyn, 08.04.2026 r.
(miejscowość, data)

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
(tytuł zawodowy/stopień/tytuł naukowy, imię i nazwisko)

Przewodnicząca Rady Naukowej
Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
prof. dr hab. Agnieszka Pszczółkowska

OŚWIADCZENIE
współautora/współautorów

Oświadczam, że w pracy pod tytułem Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest (Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products; IF: 6.200; 200 pkt) mój wkład merytoryczny w jej przygotowanie polegał na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w pracy przez mgr inż. Pawła Dudźca jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład kandydata mgr inż. Pawła Dudźca polegający na: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu.

Mariusz Stolarski

podpis/podpisy

mgr inż. Paweł Dudziec
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
Katedra Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców

Olsztyn, 08.04.2026 r.

Oświadczenie o współautorstwie w publikacjach

Oświadczam, że w pracy:
Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops a nd Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.
Mój udział szacuję na: 90%.

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.
Mój udział szacuję na: 90%.

Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800 (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji.
Mój udział szacuję na: 80%.

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; przygotowanie wizualizacji; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu.
Mój udział szacuję na: 50%.

Paweł Dudziec
08.04.2026 r.

dr hab. inż. Kazimierz Warmiński, prof. UWM
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
Katedra Chemii

Olsztyn, 08.04.2026 r.

Oświadczenie o współautorstwie w publikacjach

Oświadczam, że w pracy:
Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800 (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: walidacja wyników; analiza formalna; przegląd i redakcja manuskryptu; pozyskanie finansowania.
Mój udział szacuję na: 10%.

Jednocześnie wyrażam zgodę, aby powyższa praca została wykorzystana w pracy doktorskiej Pana mgr inż Pawła Dudźca.

Kazimierz Warmiński

prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
Katedra Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców

Olsztyn, 08.04.2026 r.

Oświadczenie o współautorstwie w publikacjach

Oświadczam, że w pracy:
Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: walidacja wyników; analiza formalna; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.
Mój udział szacuję na: 10%.

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: walidacja wyników; analiza formalna; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.
Mój udział szacuję na: 10%.

Dudziec P., Warmiński K., Stolarski M.J. 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Industrial Crops and Products, 235, 121800. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800 (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: walidacja wyników; analiza formalna; zapewnienie zasobów; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; finansowanie.
Mój udział szacuję na: 10%.

Dudziec P., Stolarski M.J. 2026. Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest – Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Industrial Crops and Products (IF: 6.200; 200 pkt).
Zakres mojego udziału był następujący: opracowanie koncepcji badania; opracowanie metodologii; walidacja wyników; analiza formalna; prowadzenie badań; zapewnienie zasobów; opracowanie i uporządkowanie danych; przygotowanie pierwotnej wersji manuskryptu; przegląd i redakcja manuskryptu; nadzór merytoryczny; koordynacja realizacji projektu; pozyskanie finansowania.
Mój udział szacuję na: 50%.

Jednocześnie wyrażam zgodę, aby powyższe prace zostały wykorzystane w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Dudźca.

8. Załączniki

8.1. Tabele Z1−Z5

Tabela Z1. Charakterystyka kwiatów w zależności od odmiany (sezon wegetacyjny 2023).

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Świeży plon kwiatów (Mg ha^{-1})	W (%)	Plon kwiatów (Mg ha^{-1} s.m.)	Zawartość olejku eterycznego (mL 100 g^{-1} s.m.)	Plon olejku eterycznego (L ha^{-1})
Odmiana	Białobrzeskie	1,06 ± 0,15 a	78,21 ± 0,98 a	0,23 ± 0,04 a	0,24 ± 0,09 ab	0,56 ± 0,22
	Henola	0,82 ± 0,66 ab	74,18 ± 1,03 b	0,21 ± 0,17 a	0,28 ± 0,07 ab	0,65 ± 0,56
	Santhica 27	0,45 ± 0,23 abc	78,63 ± 0,96 a	0,10 ± 0,05 ab	0,17 ± 0,03 b	0,17 ± 0,10
	Santhica 70	0,48 ± 0,19 abc	76,18 ± 0,34 ab	0,11 ± 0,04 ab	0,18 ± 0,05 b	0,22 ± 0,13
	Earlina 8fc	0,70 ± 0,60 abc	77,73 ± 1,72 ab	0,16 ± 0,15 ab	0,31 ± 0,03 a	0,53 ± 0,50
	Kompolti	0,26 ± 0,11 bc	76,49 ± 0,92 ab	0,06 ± 0,03 ab	0,31 ± 0,05 a	0,18 ± 0,06
	Finola	0,26 ± 0,11 bc	67,07 ± 3,59 c	0,09 ± 0,04 ab	0,27 ± 0,04 ab	0,24 ± 0,13
Średnia		0.57 ± 0.42	75,50 ± 4,06	0,14 ± 0,10	0,25 ± 0,07	0,36 ± 0,32

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Tabela Z2. Charakterystyka pozostałości po omłocie/biokoncentratu w zależności od odmiany (sezon wegetacyjny 2023).

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Plon biokoncentratu (Mg ha^{-1} s.m.)	W przed hydrodestylacją (%)	Zawartość olejku eterycznego (mL 100 g^{-1} s.m.)	Plon olejku eterycznego (L ha^{-1})
Odmiana	Białobrzeskie	1,17 ± 0,30 a	10,78 ± 0,20 bc	0,13 ± 0,03 a	1,49 ± 0,15 ab
	Henola	0,84 ± 0,42 ab	10,17 ± 0,49 c	0,12 ± 0,03 a	0,93 ± 0,35 bcd
	Santhica 27	1,11 ± 0,46 a	10,81 ± 0,21 bc	0,04 ± 0,01 b	0,47 ± 0,24 cd
	Santhica 70	0,89 ± 0,18 ab	11,36 ± 0,21 ab	0,06 ± 0,02 b	0,51 ± 0,23 cd
	Earlina 8fc	1,03 ± 0,34 a	11,17 ± 0,24 ab	0,11 ± 0,03 a	1,12 ± 0,36 abc
	Kompolti	1,33 ± 0,34 a	11,74 ± 0,60 a	0,13 ± 0,04 a	1,80 ± 0,95 a
	Finola	0,36 ± 0,09 b	11,74 ± 0,87 a	0,06 ± 0,02 b	0,22 ± 0,07 d
Średnia		0.96 ± 0.42	11,11 ± 0,69	0,09 ± 0,04	0,93 ± 0,67

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Tabela Z3. Charakterystyka cech biometrycznych w zależności od odmiany (sezon wegetacyjny 2023).

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Wysokość (cm)	Średnica (mm)	Zagęszczenie roślin/obsada (roślin ha^{-1})	Udział osobników męskich (%)
Odmiana	Białobrzeskie	146,94 ± 19,53 c	9,30 ± 1,50 bc	192626 ± 25002 a	0,15 ± 0,37 c
	Henola	51,14 ± 8,84 e	6,22 ± 0,84 d	146099 ± 78012 ab	0,69 ± 0,84 c
	Santhica 27	181,78 ± 14,57 b	11,17 ± 1,53 b	105651 ± 43912 abc	0,00 ± 0,00 c
	Santhica 70	189,99 ± 19,52 b	10,82 ± 1,01 b	95868 ± 41464 bc	1,95 ± 1,44 c
	Earlina 8fc	76,96 ± 10,86 d	7,10 ± 0,52 cd	149545 ± 55888 ab	0,71 ± 0,91 c
	Kompolti	216,40 ± 13,00 a	19,95 ± 3,46 a	43207 ± 22003 c	46,75 ± 2,25 a
	Finola	38,30 ± 3,96 e	4,27 ± 0,38 d	96569 ± 29003 bc	24,04 ± 4,47 b
Średnia		128.79 ± 69.06	9,83 ± 5,02	118509 ± 62141	10,61 ± 17,12

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Tabela Z4. Charakterystyka wilgotności biomasy i plonu w zależności od odmiany (sezon wegetacyjny 2023).

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Świeży plon biomasy (Mg ha^{-1})	W (%)	Plon biomasy (Mg ha^{-1} s.m.)
Odmiana	Białobrzeskie	11,31 ± 2,72 ab	64,95 ± 1,88 ab	3,99 ± 1,08 ab
	Henola	5,05 ± 2,32 c	62,06 ± 2,01 a	1,94 ± 0,96 cd
	Santhica 27	11,11 ± 2,77 ab	65,02 ± 1,94 ab	3,87 ± 0,88 abc
	Santhica 70	10,85 ± 2,40 ab	64,79 ± 4,87 ab	3,83 ± 0,99 abc
	Earlina 8fc	6,10 ± 2,12 bc	62,88 ± 2,39 ab	2,25 ± 0,72 bcd
	Kompolti	15,64 ± 4,60 a	67,46 ± 2,23 b	5,15 ± 1,70 a
	Finola	1,86 ± 0,52 c	62,77 ± 3,05 ab	0,69 ± 0,19 d
Średnia		8,85 ± 5,07	64,28 ± 3,12	3,10 ± 1,72

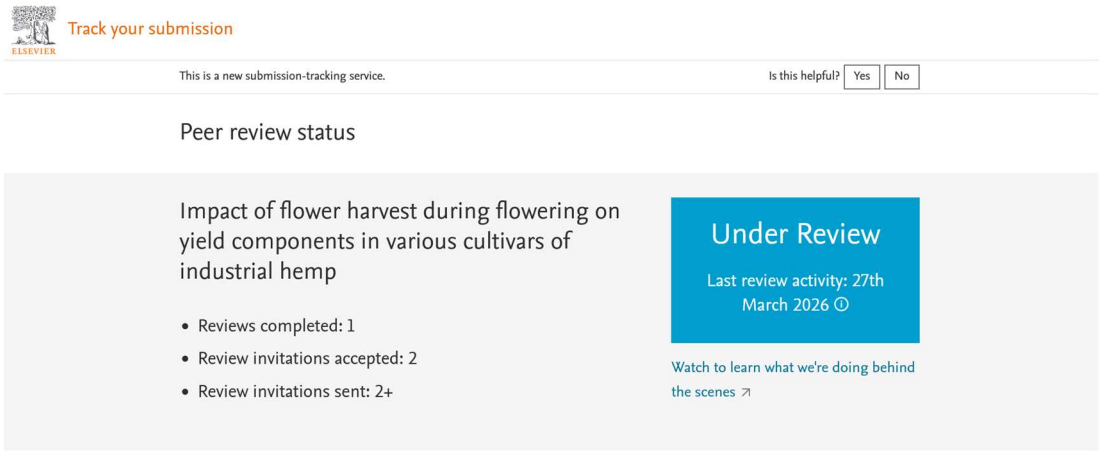
*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

Tabela Z5. Plon całkowity w zależności od odmiany (sezon wegetacyjny 2023).

Źródło zmienności	Poziom czynnika/interakcji	Całkowity plon biomasy (Mg ha^{-1} s.m.)	Całkowity plon olejku eterycznego (L ha^{-1})	Plon nasion (Mg ha^{-1})
Odmiana	Białobrzeskie	4,10 ± 1,13 ab	1,77 ± 0,31 a	0.51 ± 0.31 ab
	Henola	2,05 ± 1,05 bc	1,25 ± 0,74 ab	0.74 ± 0.41 a
	Santhica 27	3,92 ± 0,91 ab	0,56 ± 0,26 b	0.17 ± 0.17 b
	Santhica 70	3,89 ± 0,98 ab	0,62 ± 0,34 b	0.06 ± 0.02 b
	Earlina 8fc	2,33 ± 0,75 bc	1,38 ± 0,59 ab	0.72 ± 0.24 a
	Kompolti	5,18 ± 1,71 a	1,89 ± 0,98 a	0.39 ± 0.40 ab
	Finola	0,73 ± 0,17 c	0,34 ± 0,18 b	0.26 ± 0.08 ab
Średnia		3.17 ± 1.73	1,12 ± 0,77	0,41 ± 0,35

*a,b,c – grupy jednorodne, analizowane oddzielnie dla każdej cechy; brak litery oznacza brak istotności; ± – SD.

8.2. Publikacja: Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp



Impact of flower harvest during flowering on yield components in various cultivars of industrial hemp

Paweł Dudziec [a], Mariusz J. Stolarski [a,b*]

[a] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

[b] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Centre for Bioeconomy and Renewable Energies, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

*Corresponding author's email address: mariusz.stolarski@uwm.edu.pl

Abstract

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) is increasingly managed as a multi-purpose crop (biomass–flowers/essential oil–seed), yet data remain scarce for marginal soils, where crop emergence and yield stability are critical. A three-year field experiment was conducted in north-eastern Poland (53.7° N) on light, acidic soil to determine the effects of genotype, seasonal conditions, and manual flower harvesting at flowering on yield components. Seven cultivars were grown over three growing seasons (2023–2025) under two management variants: without flower harvest and with flower harvest during flowering. Flowers and the post-threshing residue (bioconcentrate) were subjected to hydrodistillation, and the results were analysed, among others, using three-way analysis of variance (ANOVA). Genotype was the main factor differentiating performance, and its effects were modified by weather conditions across years. The highest flowers yield was obtained in 2024 (0.53 Mg ha^{-1} d.m.) and varied by cultivar (0.35–0.71 Mg ha^{-1} d.m.), which translated into cultivar-dependent essential oil yields from flowers (up to 1.73 L ha^{-1} for Białobrzeskie). Manual flower harvesting increased the total essential oil yield (flowers + bioconcentrate) by 165%, whereas biomass yield and total biomass yield

did not differ significantly. The highest total essential oil yields were achieved by Białobrzeskie, Henola and Kompolti (2.08–2.39 L ha^{-1}). Seed production was higher in early-flowering cultivars, and mean seed yields reached up to 0.89 Mg ha^{-1} (Henola). Overall, flower harvest during flowering can increase essential oil yield in hemp production systems on marginal soils, while cultivar choice and the growing season/year remain important determinants.

Keywords: industrial hemp; *Cannabis sativa*; marginal soil; biomass; essential oil; bioconcentrate

1. Introduction

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) is a multi-purpose plant with significant economic value. This is largely due to its ability to produce multiple products simultaneously, including biomass, fiber, grain and high-value-added raw materials such as flowers and essential oils that contain many phytocannabinoids. To fully understand its economic potential, it is important to assess the crop yield across these different product streams (Hammami et al., 2022; Schumacher et al., 2020; Varga et al., 2025). The growing interest in hemp cultivation is further influenced by legal conditions (e.g., THC limits) and a historically limited knowledge base due to restrictions, which increases the need for research and practice recommendations (Duong et al., 2023; Varga et al., 2025). Moreover, hemp is influenced by photoperiod, indicating that the adaptation of cultivars to day length and latitude affects their flowering time, the length of the vegetative phase, and their potential for biomass accumulation (Reinhardt et al., 2021; Saragoca et al., 2026; Zhang et al., 2021). For this reason, emphasis is placed on studying and evaluating a larger number of cultivars under the conditions of a particular latitude, and on verifying the interaction between genotype and sowing date and genotype and the particular season (Bajwa et al., 2025a; Chiluwal et al., 2023).

At the same time, industrial hemp is being considered in terms of the management of marginal lands and creating value chains, in which cultivar selection, interannual variability, and raw material quality influence production recommendations (De Vos et al., 2023; Giannoulis et al., 2024; Todde et al., 2022). There is growing interest in planting hemp in poorer and marginal locations, but research indicates that soil limitations and water deficits can reduce productivity, and plant response depends

on the season and genotype (Blandinieres & Amaducci, 2022; Vandepitte et al., 2020; Zydelis et al., 2022). Water deficit experiments have shown that hemp can activate mechanisms to reduce transpiration and maintain reproduction at the expense of biomass, which justifies the usefulness of field experiments to capture the variability of responses in different years (Gill et al., 2022). Cultivation technology elements, such as plant density (including the accepted sowing density/rate), sowing date, and fertilization can modify growth, canopy architecture and yield, and these effects can be highly determined by cultivars and environmental conditions (Ceyhan et al., 2022; Kaur et al., 2024; Wielgus et al., 2022; Wylie et al., 2020; Yazici, 2023;). Also important are the plasticity of root system characteristics, interactions with heterogeneous availability of water and nutrients, and interactions with biotic factors (e.g., soil microorganisms), as these can influence plant responses under poorer site conditions (Bajwa et al., 2025b; Islam et al., 2023).

The extraction of essential oils from inflorescences is developing particularly dynamically, and the demand for products containing hemp extracts enhances the importance of research into, e.g., the content and yield of essential oils depending on cultivation conditions (cultivar, growing season/year, environment, management practices/cultivation strategies) (Dudziec et al., 2024; Pieracci et al., 2021; Zheljazkov et al., 2020a; Zheljazkov et al., 2020b; Zheljazkov et al., 2025;). The composition of metabolites in generative organs changes during flowering and after anthesis, indicating that the timing and method of harvesting can significantly affect both quality parameters and potential product yield (Ji et al., 2021; Rahem et al., 2021; Rehman et al., 2021; Yang et al., 2020). Research results also pointed to the importance of cultivar × developmental stage interactions, which justifies the design of multifactorial experiments involving different genotypes and harvest times (Abdollahi et al., 2020). In agricultural practice, "dual-purpose" systems are increasingly being considered, in which, for example, raw material can be obtained from inflorescences, and the remaining biomass (e.g., seeds, stalks) can be utilized. However, the literature emphasizes the existence of yield trade-offs and the need for empirical assessment of the impact of treatments on yield structure (Campiglia et al., 2017; Dudziec et al., 2024; Ortmeier-Clarke et al., 2023; Sullivan et al., 2025; Tsaliki et al., 2021). The technology chain for obtaining inflorescence raw material also produces fractions after separation/threshing (e.g., threshing residue, also referred to as bioconcentrate), which can be a source of essential oils, but

84 require assessment of their content or variation in relation to genotype (Bajwa et al., 2023; Dudziec et
85 al., 2025; Zheljazkov & Maggi, 2021). The valorization of by-products or the biorefinery approach are
86 also important, because the "path" to obtaining an extract, e.g., essential oils, generates residues, and
87 the profitability of the entire chain may depend on their utilization (Burgel et al., 2020; Brar et al.,
88 2024; Scordia et al., 2022).
89 There is a need for research that considers the environment (including poorer soil conditions, often
90 referred to as marginal), growing seasons/years, genotypes and plantation management practices,
91 while also explaining the variability in the bio-raw materials obtained (Blandinieres & Amaducci,
92 2022; Pieracci et al., 2021; Reinhardt et al., 2021). In light of reports of the strong influence of
93 genotype selection and agrotechnical practices on yield, and the qualitative variability of generative
94 fractions, it is justified to conduct rigorous field experiments that enable the separation of the effects
95 of cultivar, year and field treatments under poorer soil conditions (Bajwa et al., 2025a; Hammami et
96 al., 2022; Kaur et al., 2024; Pieracci et al., 2021).
97 The present study addresses the research problem of how poor soil conditions in north-eastern Poland
98 impact the growth, biometric characteristics, and yield of industrial hemp. Additionally, it investigates
99 how these yield components are influenced by factor such as cultivar, year, and manual flower harvest
100 during the flowering period. Moreover, it was assessed whether manual flower harvesting during
101 flowering affects final biomass yield and seed yield, and whether it is possible to simultaneously
102 increase essential oil yield while maintaining comparable biomass an seed yield. The study was
103 conducted in a strict field-experiment. The knowledge gap to be addressed involves the integrated
104 assessment of essential oil yield and the content of essential oils in flowers and threshing residue
105 (often referred to as bioconcentrate). The novelty of the approach was to combine analyses of the
106 impact of cultivar, year, and manual flower harvest under the poor soil conditions of north-eastern
107 Poland (53.7° N) to address the research problems.
108
109 **2. Materials and methods**
110 *2.1. Study object*

The field experiment conducted by the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, University of Warmia and Mazury (UWM), in Olsztyn, was located at the Bałdy Teaching and Research Station, Tomaszkowo branch of UWM (Coordinates: 53.71, 20.43). The experiment spanned three consecutive years/growing seasons (2023–2025) and was conducted at a poor-soil site. It was a lessive soil with an arable soil granulometric composition corresponding to light clay sand, low soil organic carbon content (0.81%), and low pH (4.7). Detailed characteristics of the soil site are presented in the Supplementary data (Table S1).

The experiment was carried out in a randomized block design with three replicates and comprised 42 plots: 7 cultivars × 2 flower-harvest variants (with and without flower harvest during flowering) × 3 replicates. Each plot covered an area of 14.4 m^2 (plot length of 9 m, plot width of 1.6 m, and the inter-row width of 0.4 m). Seven cultivars were cultivated: Białobrzeskie and Henola (country of origin: Poland); Earlina 27, Santhica 27 and Santhica 70 (France); Finola (Finland); Kompolti (Hungary). The genotypes differed not only in origin but also in sexual type (dioecious vs. monoecious) and population type/breeding category (Table S2 in the Supplementary data). The sowing density/rate was always 100 seeds capable of germination (under laboratory conditions) per square meter of the experimental field. Considering, among other things, the varied thousand-seed weight (Table S3 in the Supplementary data), this amounted to, on average, 15, 16, 20, 20, 14, 29, and 14 kg of seeds ha^{-1} (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8fc, Kompolti, and Finola, respectively).

The forecrop in each year of the study was common oats (*Avena sativa*). After the oats were harvested, the sequence of agrotechnical treatments was always as follows: post-harvest cultivation; liming (granulated chalk with 80% $CaCO_3$ content, crushed, at a rate of 600 kg ha^{-1}; calcium oxide (CaO) equivalent of 45%); pre-winter ploughing; pre-sowing cultivation (using a cultivator), and pre-sowing fertilization combined with harrowing (N – 60, P_2O_5 – 45, K_2O – 60 kg ha^{-1}; N in the form of ammonium nitrate; P in the form of triple superphosphate; K in the form of a potassium salt). Sowing dates: 15 May 2023; 15 May 2024, and 06 June 2025 (row seed drill was used; sowing depth of 3 cm). No chemical plant protection products were used during cultivation, and only mechanical treatments were employed. Nitrogen was applied as a topdressing during the growing season in the form of ammonium nitrate at 60 kg ha^{-1}.

139 Meteorological conditions varied across growing seasons, and are presented in Supplementary data
140 (Table S4–S5 and Fig. S1–S3), including the use of Sielianinov hydrothermal coefficient (Stadnik et
141 al., 2024).
142
143 *2.2. Yield, biometrics and phenological observations*
144 As mentioned earlier, each cultivar was grown in two variants: with and without flower harvest. The
145 flowers (also referred to as inflorescences or panicles) were harvested by manually cutting off the
146 panicles of female plants, located at the tops of the main shoots (a maximum of approximately 15 cm
147 was cut off). Flowering was defined as the phenological stage at which the bracts bore pistils, with
148 white stigmas protruding beyond the bracts; brown stigmas, if present, represented a distinctly smaller
149 proportion. Under the BBCH codification system, this corresponded to code 65 (before 67, when fruit
150 set is visible) (Mishchenko et al., 2017), and according to the codification of Mediavilla et al. (1998),
151 to the stage found around 2202 (dioecious cultivars) and 2302 (monoecious cultivars). Flowers were
152 harvested when, on at least two plots (each experimental variant was carried out in three replicates),
153 more than half of the plants were in this phase. All collected flowers were weighed, and samples were
154 taken for laboratory determination of the moisture content. The remaining flowers were frozen.
155 To limit edge effects, plants were collected only from the interior of the plots (9.6 m^2). The harvest
156 timing, without considering random events, such as the availability of labor and means of production,
157 or meteorological conditions (Fig. S1–S3 in the Supplementary data), was determined based on the
158 phenological phase. The harvest was carried out when, on a minimum of two plots, more than half of
159 the plants had more than half of their ripe fruits in the middle part of the panicles. According to the
160 BBCH scale, this corresponded to code 85 (Mishchenko et al., 2017), and according to the codification
161 of Mediavilla et al. (1998), to stages 2204 (dioecious cultivars) and 2306 (monoecious cultivars). The
162 plants were harvested using a brush-cutter fitted with a cutting blade, and weighed on a platform scale.
163 At the same time, the harvested shoots were collected for laboratory determination of biomass
164 moisture content. In this manner, biomass yield and total biomass yield were determined (in the case
165 of plots with flower harvest during flowering, this was the sum of biomass yield and flower yield).
166 The upper parts of the stalks, on which the panicles were found, were then cut off. The upper parts of

167 the stalks with panicles were threshed in a combine harvester, resulting in a mixture of seeds and
168 threshing residue/bioconcentrate (leaves, flowers, green and brown calyces forming the nut cover,
169 green calyces with unripe nuts, empty nuts and seeds, small twigs constituting the axes of
170 inflorescences, fiber and hurd/shives fragments). The process also resulted in the acquisition of the
171 threshed upper parts of the stalks. All stalks were left in the field (used for other studies). The mixture
172 of seeds and bioconcentrate was stored in a closed barn with access to fresh air. After natural drying,
173 the seeds were separated from the mixture. A laboratory separator (SZD type) was used to determine
174 the weight of the cleaned grain (Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego, Poland). Individual
175 fractions were weighed, and their yields were determined. The entire batch was stored in sealed plastic
176 containers. In 2023, due to limited access to a plot harvester, among other factors, the mixture of seeds
177 and bioconcentrate was manually separated from the stalks, yielding a bioconcentrate fraction that was
178 essentially free of fiber and shive/hurd impurities. It should also be noted that this year, the mixture
179 was separated from the entire length of the shoots, not only from the upper parts of the stalks. This
180 procedure resulted in a fraction containing more, e.g., flowers and leaves, relative to its mass. The rest
181 of the procedure for handling the material was the same as in other years of the study.
182 On the day of harvest (Table S6 in the Supplementary data), measurements of the height and diameter
183 of the stalks were taken (10 random measurements per inner part of each plot). During the flowering
184 phase, the proportion of male plants and plant density were determined (all plants on the plot and all
185 male individuals were counted). As part of phenological studies, the dates of the beginning of
186 flowering, flowering, late flowering/beginning of seed maturation and seed ripening were determined.
187 The beginning of flowering was understood as the appearance of bracts, still without stigmas; the stage
188 between 2202 and 2203, and between 2302 and 2303 according to Mediavilla et al. (1998); BBCH
189 approximately 55 (Mishchenko et al., 2017). In the late flowering/ beginning of seed maturation phase,
190 the bracts had brown stigmas, with some of the stigmas being bent downwards, and, at the same time
191 whitish trichomes were visible; the flowers began to stick to the fingers and gave the impression of
192 being resinous (stages 2203 and 2303 according to Mediavilla et al. (1998); BBCH 67 (Mishchenko et
193 al., 2017)). Seed ripening, on the other hand, was the moment when individual bracts within the

194 panicles were brownish, and some bracts had ripe nuts inside (stage 2200 and 2300 according to
195 Mediavilla et al. (1998); BBCH 81 (Mishchenko et al., 2017)).
196
197 *2.3. Laboratory analysis*
198 After the samples were delivered to the laboratory, their moisture content was determined. The
199 samples were placed in a laboratory dryer at 105 °C, and dried to constant weight (standard PN-EN
200 ISO 18134–1:2015). Flowers and bioconcentrates were hydrodistilled in accordance with standards
201 PN-EN ISO 6571 and PN-EN ISO 6571:2009/A1. Each time, 200 g of flowers removed from the
202 freezer were placed in 2 L flasks, and, for the bioconcentrate, 100 g of this material was added to the
203 flasks. They were then poured over with 1300–1350 mL of distilled water. In 2023, due to the lower
204 quantities of bioconcentrate and flowers obtained, 50 g of bioconcentrate and 100 g of flowers,
205 respectively, were added to 1 L flasks. They were then poured over with 600 mL of distilled water.
206 The hydrodistillation period was always 4 hours (counting from the moment of the start of boiling).
207 Before hydrodistillation, the moisture content of the bioconcentrate was determined. The essential oil
208 content was converted to mL 100 g^{-1} d.m. (dry matter). Next, the essential oil yield was calculated and
209 expressed in L ha^{-1}.
210 In 2024 and 2025, the predicted content of cannabidiol (CBD) and tetrahydrocannabinol (THC) in
211 flowers was additionally determined at the flowering, late-flowering and seed-ripening stages. For this
212 purpose, a portable near-infrared spectroscopy device (NIRLAB Cannabis) was used to non-
213 destructively identify the sample's composition based on its reflectance spectrum. The measurement
214 involved directing the measuring head at the material (flowers), taking readings at two locations on the
215 sample, and then averaging the spectra. To further limit the impact of plant material heterogeneity,
216 five flowers were collected from each plot (i.e., 30 flowers per cultivar in a particular phenological
217 phase). In order not to affect the main objective of the field experiment, the flower samples for this
218 additional test were not collected from the inner parts of the plots. After collection, the flowers were
219 naturally partially dried in a closed room to a moisture content of approximately 10%. This moisture
220 content enabled spectrometric measurements to be conducted.
221

222 *2.4. Statistical analysis*

223 The normality of the distribution of the characteristics under analysis was verified using the Shapiro–
224 Wilk test. Next, a three-factor analysis of variance (ANOVA) was conducted, with cultivar, year, and
225 flower as the main factors. Interfactor interactions were considered as well. Arithmetic means and
226 standard deviations were determined for all parameters. Homogeneous groups were identified using
227 Tukey's multiple comparison test (HSD) at a significance level of $p<0.05$. To determine what
228 proportion of the variability of a particular characteristic was explained by individual factors and their
229 interactions, the contributions of these effects to the total sum of squares (SS) were calculated. The
230 relationships between selected parameters were analyzed using Pearson correlation coefficients
231 ($p<0.05$). In the agglomerative hierarchical clustering analysis, the input data were standardized within
232 columns; Ward's method was used for agglomeration, Euclidean distance was used as a measure of
233 similarity, and the results were presented in the form of a dendrogram. Principal component analysis
234 (PCA) was carried out on standardized data. The results were presented as variable correlation circles
235 and case projections onto the PC1–PC2 plane, which enabled the assessment of relationships between
236 characteristics and similarities between objects
237

238 **3. Results and discussion**

239 *3.1. Sources of essential oils*

240 *3.1.1. Flowers*

241 The highest average flower yield, i.e., 0.53 Mg ha^{-1} d.m., was obtained in 2024 (Table 1). This was
242 approximately 0.08 Mg ha^{-1} d.m. higher than the yield in 2025 (Table 1), and approximately 0.39 Mg
243 ha^{-1} d.m. higher than that in 2023 (Table S7 in the Supplementary data). In 2023, after sowing the
244 seeds (15 May 2023), rainfall was followed by approximately 30 days without precipitation (Fig. S1).
245 Surprisingly, there had also been no rainfall for over two weeks prior to sowing (1 May–14 May
246 2023). This resulted in a dramatic reduction of industrial hemp seedling emergence, leading to, *inter*
247 *alia*, a drastically low flower yield. May 2023 was the driest month, compared with May 2024 and
248 May 2025 (Table S4). The granulometric composition of the arable soil in each experimental season
249 corresponded to light clay sand (Table S1). Therefore, the rainfall on 15 May 2023 likely evaporated

250 quickly and moved rapidly through the soil profile, thereby feeding much deeper groundwater. The
251 combination of these factors may have resulted in unsuitable conditions for germinating sown seeds,
252 due to high average air temperatures (approximately 20 °C from 15 to 30 May 2023). Such extremely
253 unfavorable meteorological conditions affected not only the first quantitative parameter, i.e., flower
254 yield, but also the others, which is why 2023 differed significantly from 2024 and 2025. Therefore, the
255 2023 results are presented in the Supplementary data. The highest average flower yield was obtained
256 from the Białobrzeskie cultivar (0.71 Mg ha^{-1} d.m., homogeneous group "a"), and the lowest from
257 Finola (0.35 Mg ha^{-1} d.m., "c") (Table 1). The flower yield of Białobrzeskie was almost twice as high
258 as that of Finola. Throughout the three-year experiment, the highest flower yield was noted for Henola
259 in 2024 (0.75 Mg ha^{-1} d.m.). Białobrzeskie was also distinguished by the most stable flower yield (the
260 lowest dispersion in 2024–2025 and 2023). During the 2023–2025 experiment period, native Polish
261 cultivars produced the highest flower yields (Table 1 and Table S7).
262
263 **Table 1**
264
265 The average flower yield in a study conducted in Italy ranged from 1.57 to 1.91 Mg ha^{-1} d.m.,
266 depending on the year (Baldini et al., 2018), and from 0.45 to 0.53 Mg ha^{-1} d.m. in the current study
267 (Table 1). However, the Italian study used irrigation (whereas the current study did not). Furthermore,
268 in the Italian study, sowing density was higher (130 vs 100 viable seeds m−2), as was soil pH (7.3 vs
269 4.7; Table S1). The Italian researchers collected flowers at a similar stage, with panicles cut at the
270 level of the first basal flowers of the inflorescence (in the current experiment, up to 15 cm from the top
271 of the shoot). The combination of these factors, among others, resulted in differences in the flower
272 yield. In another Italian study, the lowest flower yield was 1.09 Mg ha^{-1} d.m. for the Fedora cultivar
273 (Vuerich et al., 2019), which is 0.38 Mg ha^{-1} d.m. more than the highest yielding cultivar in the
274 current study, Białobrzeskie (0.71 Mg ha^{-1} d.m.) (Table 1). However, in that study, irrigation was
275 used; soil pH and soil organic matter were higher, and the soil was less sandy/light. Moreover, with
276 regard to Polish cultivars grown under Polish climatic conditions, the flower yield was low
277 (Białobrzeskie – 0.71, and Henola – 0.56 Mg ha^{-1} d.m.), as, for example, Burczyk et al. (2009)

obtained a flower yield of 2.8 Mg ha^{-1} (at 18% moisture content) for the Polish cultivar Silesia (at almost identical sowing density, and at the full flowering stage). This is most likely the result of a poor soil site in the current study, as it contrasts with brown soil formed on clay after winter wheat, with a pH of up to 6.6 (Burczyk et al., 2009).

Moisture variation was insignificant, as evidenced by only two homogeneous groups (Table 1). The highest average flower moisture content was noted in 2025 (77.30%). In previous years, it was similar to this level: in 2024, it was 1.7 percentage points (pp) lower, and in 2023, it was 1.8 pp lower (Table S7). The largest spread in the average moisture content, amounting to 12.93 pp, was recorded for Finola (67.07% in 2023 vs 80.00% in 2025). In other studies, Cannabis flower moisture content was reported at 80% (Chen et al., 2021), 79% (Addo et al., 2024) or 70−72% (de Melo et al., 2023). Without considering the moisture content of fresh flowers, the yield ranged from an average of 1.47 to 2.86 Mg ha^{-1}, depending on the cultivar (Table 1). Nevertheless, the division of cultivars into homogeneous groups was the same as for the flower yield (Mg ha^{-1} d.m.). Campiglia et al. (2017) reported a fresh flower yield for Santhica 27 of 1.29 Mg ha^{-1}, which was lower than the yield for Santhica 27 in the current study (1.96 Mg ha^{-1}) (Table 1), with similar plant density (40 and 33 plants m^{-2}, respectively; the plant density is presented in subsection 3.2). This is noteworthy because the soil in the cited experiment was equally sandy (76.3% sand vs 72.14% in the current study; Table S1) and had a comparable organic matter content (1.3% vs 1.4% in the current study; Table S1). The difference in yield could be attributed, e.g., to nitrogen fertilization (the total N dose in the study by Campiglia et al. (2017) was 70 kg ha^{-1} lower) and to location and associated meteorological conditions.

The significantly highest essential oil content of the flowers was noted for Kompolti, Finola and Białobrzeskie, i.e., the only two dioecious cultivars and a Polish monoecious cultivar that also exhibited the highest flower yield (Table 1). They formed group “a”, in which the average essential oil content was 0.24–0.26 mL 100 g^{-1} d.m. Santhica 27 showed the lowest essential oil content, and was the only cultivar in group “b” (the oil concentration was 21–27% lower than in group “a”). The values for the other cultivars were intermediate and did not differ significantly from those of the two groups. Interestingly, when analyzing the entire three years of the experiment, the highest average oil concentration was observed in 2023 (0.25 mL 100 g^{-1} d.m. vs 0.24 in 2024 and 0.19 mL 100 g^{-1} d.m.

306 in 2025) (Table S7), and the variation within the year, expressed as standard deviation, did not differ
307 from the following two years. The 2023 season was the driest throughout the three-year experiment,
308 while 2025 was the most humid (Tables S4 and S5). The hydrothermal conditions during the growing
309 season and, above all, during the flower harvest period (Finola was harvested earliest – always in July,
310 while Kompolti was harvested latest – always in September), may have been responsible for the
311 heterogeneity of the essential oil content in individual years. The results suggest that more humid
312 seasons may reduce essential oil concentration in the flowers.
313 In an Italian study of eight cultivars, the average essential oil content was 0.2–0.3% (Baldini et al.,
314 2018). In another Italian study, the concentration in inflorescences, averaged across environments and
315 cultivars, was 0.25% (Vuerich et al., 2019). In contrast, in the current study, a range of 0.16–0.26%
316 was obtained for seven cultivars (Table 1). The contents were similar, despite the different cultivars
317 used. The Fedora cultivar, grown in Iran, at the flowering stage also showed an essential oil content
318 within this range (0.21%), but two native cultivars (Fars and Yazd provinces; also at the flowering
319 stage) exhibited much higher contents (0.45 and 0.80%) (Abdollahi et al., 2020). This suggests that
320 native cultivars may have higher concentrations, although this was not the case in the current study.
321 Polish cultivars (Białobrzeskie and Henola) did not differ in this respect from the vast majority of
322 other cultivars (the only exception was Santhica 27, which showed a significantly lower content)
323 (Table 1). It is worth noting that the content of essential oils increased significantly when the harvest
324 was delayed from full flowering to full plant maturity (Strzelczyk et al., 2023). In the current study,
325 flower harvesting was conducted during flowering; delaying the harvest date, e.g., until the late-
326 flowering stage, could yield higher yields.
327 The yield of flower essential oil was determined by both flower yield and essential oil content.
328 Therefore, Białobrzeskie, the only cultivar belonging exclusively to group “a”, had the highest average
329 hydrodistillate yield (an average of 1.73 L ha^{-1}) (Table 1). The significantly lowest average of
330 1.03 L ha^{-1} (i.e., approximately 60.1% less) was noted for Santhica 27 (“c”). The second highest result
331 was noted for Kompolti (1.41 L ha^{-1}, “ab”). However, the variability for this cultivar was almost twice
332 as high (standard deviation of 1.02 L ha^{-1} for Kompolti vs 0.57 L ha^{-1} for Białobrzeskie).

333 The essential oil yield obtained was low (an average of 0.86–1.33 L ha^{-1}, depending on the year)
334 compared with the Italian study (3.96–4.80 L ha^{-1}) (Baldini et al., 2018). In another Italian study, the
335 lowest essential oil yield was obtained for the Fedora cultivar (2.4 L ha^{-1}) (Vuerich et al., 2019),
336 which was still 0.67 L ha^{-1} higher than that for the most productive cultivar in the current study,
337 Białobrzeskie (1.73 L ha^{-1}). The reasons mentioned earlier in the discussion concerning flower yield
338 should also be considered causes of the lower yields of essential oils. The essential oil yields were also
339 lower than those reported in a study by Menghini et al. (2021), in which Futura 75 produced 2.6 L ha^{-1}
340 on the least fertile soil. In this case, the difference may also have been due to the more optimal soil
341 composition (57.9% sand, 26.5% silt, and 15.6% clay; neutral pH of 6.9). Furthermore, in that study,
342 the top 30 cm of the stem was cut rather than 15 cm (as in the current study), and the flowers were
343 harvested at the beginning of seed ripening, resulting in a higher weight than at the flowering stage.
344
345 *3.1.2. Bioconcentrate*
346 Cultivar differentiated all bioconcentrate parameters, i.e., yield, moisture before hydrodistillation,
347 essential oil content, and essential oil yield (Table 2). Year had no effect on essential oil content,
348 whereas flower harvest did not affect any of the characteristics analyzed. Among interactions, the
349 Cultivar × Year interaction had the most pronounced effect on bioconcentrate parameters, accounting
350 for three of the four characteristics under analysis, including the most crucial for flower management,
351 namely bioconcentrate essential oil yield.
352
353 **Table 2**
354
355 In terms of bioconcentrate yield, the average values for cultivars ranged from 0.68 to 1.06 Mg ha^{-1}
356 d.m. (Table 3). The significantly highest yield was obtained from Henola (group "a"), and the lowest
357 yield was noted from Finola ("b"). The difference was 0.38 Mg ha^{-1} d.m., i.e., approximately 36%.
358 The other cultivars had intermediate values. The average yield for 2025 was almost twice that in 2024
359 (1.16 vs 0.58 Mg ha^{-1} d.m.), with less variation (0.31 vs 0.18 Mg ha^{-1} d.m.). Paradoxically, as it may
360 seem, the year 2023 was characterized by an intermediate bioconcentrate yield value, i.e., 0.96 Mg

361 ha^{-1} d.m. (Table S8). However, this is because, in that year (as noted in the methodology), the
362 bioconcentrate was not threshed by a combine harvester but was manually separated from the shoots
363 along their entire length. In addition, manual separation was more accurate and reduced process losses,
364 but required much more time and effort. Flower harvesting during the flowering period did not
365 significantly affect the bioconcentrate yield. The highest amount of threshing residue in 2024–2025
366 was obtained from the Kompolti cultivar in 2024 (1.29 Mg ha^{-1} d.m.).
367 Burgel et al. (2020) report that the threshing residue of inflorescence, collected during seed harvest,
368 supplied an estimated biomass yield of up to 200 g m^{-2} (i.e., 2 Mg ha^{-1}), which is almost twice the
369 average bioconcentrate yield of the most productive Henola cultivar (1.06 Mg ha^{-1} d.m.) (Table 3). In
370 a study by Sugier et al. (2025), the entire infructescence after threshing (including stems, lateral
371 branches, leaves, and bracts) yield for Finola was 2.03 Mg ha^{-1} d.m., and exclusively bracts and leaves
372 amounted to 1.16 Mg ha^{-1} d.m. In contrast, in the current study, the average bioconcentrate yield for
373 the same cultivar was 0.68 Mg ha^{-1} d.m. (Table 3). Apart from the effect of a more fertile soil site with
374 a higher pH in the study by Sugier et al. (2025), the higher yield may also result from the fact that, in
375 their study, the infructescences were harvested by cutting off the upper part of the plant stem at the
376 height of the first lower side branch of the infructescence. In the current study, however, only the
377 upper parts of the shoots with panicles, where the greatest mass of flowers was located, were cut off. It
378 is also worth noting that hemp seeds/bioconcentrate can be harvested in one, two or three stages
379 (Assirelli et al., 2020). In the current study, three stages (cutting stalks, threshing, and separating the
380 seeds) were associated with process losses (volatile compounds or biomass) resulting from handling
381 the material at each stage. This factor may also have reduced yield compared with hemp processing,
382 where all operations are performed manually.
383
384 **Table 3**
385
386 Moisture content values before hydrodistillation were similar, with the average value never exceeding
387 15.76% (Table 3 and Table S8). This is important because a high moisture content of the material

388 prior to hydrodistillation may indicate poor storage conditions and degradation of the bioconcentrate,
389 thereby reducing essential oil content.
390 The significantly highest average bioconcentrate essential oil content was noted for the Polish Henola
391 cultivar, and amounted to 0.10 mL 100 g^{-1} d.m. (group "a") (Table 3). This was over 230% higher
392 value than in group "d", which consisted of French biomass/fibrous cultivars Santhica 27 and
393 Santhica 70. Given the cultivars' specialization in producing specific raw materials, the only surprise
394 was the 20% lower oil content of Kompolti and Białobrzeskie (both tall cultivars recommended for
395 producing, e.g., fiber) compared with Henola. In 2023, the bioconcentrate contained higher amounts of
396 hydrodestillate (an average of 0.09 mL 100 g^{-1} d.m., Table S8), most likely due to manual separation
397 (the bioconcentrate was practically free of fiber or shives/hurd) rather than to the driest conditions and
398 low plant density in 2023. The dispersions of essential oil contents in 2024−2025 and throughout the
399 entire 2023−2025 experiment period did not exceed 33.3% (this maximum value was noted for the
400 Białobrzeskie × 2025 interaction, Table 3).
401 The present study confirmed that threshing residues, i.e., a by-product of seed separation, can be used
402 for the extraction of essential oils (Balndinieres & Amaducci, 2023; Spampinato et al., 2024). In a
403 study by Ascrizzi et al. (2019), the essential oil content in threshing residues ranged from 0.01 to
404 0.12%, depending on the location and harvest date (for the Fedora 17 cultivar). The yield in the current
405 study was similar, ranging from 0.03 to 0.10% across cultivars (Table 3). However, compared with oil
406 from the entire infructescence after threshing (including stems, lateral branches, leaves, and bracts), or
407 exclusively bracts and leaves, the essential oil content was lower (0.16–0.22 and 0.27–0.33%,
408 respectively; the Finola cultivar; location: Poland) (Sugier et al., 2025). The higher contents reported
409 by Sugier et al. (2025) result, *inter alia*, from the absence of unripe nuts, empty nuts and seeds, or
410 fiber, as well as hurd/shive fragments, in these two fractions (the bioconcentrate in the current study
411 contained these fractions). Furthermore, in the study by Sugier et al. (2025), threshing was performed
412 manually (combine threshing involves manipulation of the bioconcentrate, which can cause losses of
413 volatile fractions or biomass, and thus also essential oil content).
414 Finally, Henola had the highest average essential oil yield (1.02 L ha^{-1}, group "a"), and Earlina 8fc
415 had the second highest yield (0.79 L ha^{-1}, "ab"). These two cultivars, along with Finola, belong to the

so-called seed or flower/seed cultivars (due to well-developed and lush inflorescences, which should constitute the main part of their bioconcentrate). Therefore, the low essential oil yield for Finola (0.48 L ha^{-1}, "cd") represents a certain deviation, which was certainly the result of low yield and poor performance of this cultivar under the conditions of the experiment. Santhica 27 and Santhica 70, i.e., French fiber/biomass cultivars, had the statistically lowest yield (0.24 L ha^{-1}, "d" for both of them) (Table 3). Their bioconcentrate, among other things, higher amounts of fiber and shives/hurd fractions in its composition, and was not as organoleptically aromatic as the other cultivars. Except for the lowest-yielding cultivars, Henola offered not only the highest yield but also the greatest stability (deviation of 0.28 L ha−1; Table 3). The 2024 season was generally more productive compared with 2025 (0.80 vs 0.41 L ha^{-1}). In 2023, the average essential oil yield was the highest (0.93 L ha^{-1}), but, as emphasized earlier, this result cannot be objectively compared with 2024 and 2025. In 2023, unlike in other years, the bioconcentrate fraction was manually obtained from the stems over their entire length, resulting in lower fiber and shives/hurd contents. Furthermore, the bioconcentrate was separated from the entire length of the shoots, not only from their upper parts. This procedure resulted in a bioconcentrate that contained, among other components, increased amounts of flower and leaf fractions. The absence of threshing by a combine harvester likely led to reduced loss of volatile fractions (threshing with a combine harvester generates can generate elevated temperatures that affect this bio-raw material, causing the volatile chemical compounds in the oil to dissipate). This is a practical tip for smaller farms, as it suggests compensating for the lack of mechanization to offset the higher physical labor costs. On the other hand, such extremely dry conditions as those in 2023 are particularly informative regarding their impact on bioconcentrate essential oil yield and encourage future research in this area.

Sugier et al. (2025) investigated the essential oil yield from the entire infructescence after threshing (including stems, lateral branches, leaves, and bracts), as well as from bracts and leaves alone. In the first case, the yield for the Finola cultivar was 3.9 L ha^{-1}; in the second, 3.5 L ha^{-1}. Departing from the aforementioned reasons for higher yields, the difference in flower yield is very well reflected in the final height of the plants. Sugier et al. (2025) collected infructescence from Finola hemp plants that were at least 2.4 m tall, whereas in the current study, Finola reached only approximately 1.2 m in

444 height (biometrics are described in subsection 3.2). Since Finola is a cultivar in which the panicle
445 covers most of the length of the shoot, the height of the plants alone indicates a certain potential for
446 the essential oil yield (it should be assumed that shorter plants produce lower yields). The current
447 study focused on essential oils; however, it is also possible to extract threshing residues with hexane,
448 dichloromethane, ethyl acetate, or ethanol to determine the yield (Mahou et al., 2025).
449
450 *3.2. Biometrics and phenological observations*
451 On average, the Kompolti cultivar with the longest development cycle of 157 days (Table S6),
452 produced the tallest plants (approximately 313 cm, Table 4). Santhica 70 was included in the same
453 homogeneous group "a," with an average value of approximately 304 cm. At the same time, these two
454 cultivars exhibited the greatest height variation (33.82 and 32.95 cm, respectively). Finola, with the
455 shortest development cycle, was the shortest and the only one included in group "d". The height
456 difference between Finola and the first group plants was 183−191 cm, i.e., 151−158%. Overall, the
457 flower/seed cultivars (Finola, Henola, and Earlina 8fc, all with the shortest development cycles)
458 ranked as the shortest and were included in groups "c" and "d". The years 2024 and 2025 showed little
459 variation in height (approximately 227 and 225 cm, respectively), whereas in 2024 they were less
460 stable (standard deviation of almost 93 cm). In contrast, the year 2023 differed significantly in terms
461 of height (96−98 cm difference, i.e., 75−76% compared with the years 2024−2025, Table S9). Flower
462 harvesting during flowering resulted in a lower final height of hemp plants on average, but the
463 difference was not significant (approximately 222 cm vs approximately 231 cm). When individual
464 cultivars are examined by year, the average height of approximately 334 cm (Kompolti × 2024) was a
465 record-breaking result in the experiment.
466 The final height of the Finola cultivar was 121 cm (Table 4) with a development cycle of 107 days
467 (Table S6). This clearly illustrates the limitations of soil site conditions and/or meteorological
468 conditions, as in an Italian Alpine valley, a height of 150 cm was achieved on the 75th day of
469 cultivation of the same cultivar; however, it should be noted that smaller row spacings were applied
470 (0.1 m vs 0.4 m in the current study) (Pavlovic et al., 2023). In industrial hemp experiments, taller
471 plants are obtained with smaller spacings (Viskovic et al., 2024). In a study by Campbell et al. (2025),

472 the heights of 13 industrial hemp cultivars were measured at maturity, with average heights ranging
473 from 113 to 210 cm; however, later-maturing cultivars were taller. The latter correlation was also
474 confirmed in the current study. Despite lower sowing densities and wider row spacing in the current
475 study, the average height range was greater than in the above-mentioned study by Campbell, and
476 ranged from 121 to 313 cm across cultivars (Table 4). Therefore, the difference in height range
477 between these studies must have been caused by other factors, such as the selected genotypes
478 (although Białobrzeskie was the only cultivar used in both experiments), geographical latitude or
479 meteorological conditions.
480
481 **Table 4**
482
483 The stalk diameter ranged from 7.76 to 16.04 mm, depending on the cultivar (Table 4). The difference
484 between groups "a" and "d" was 43−55%. As with height, Kompolti and Santhica 70 showed the
485 largest diameters (averages of 16.04 and 15.01 mm, respectively). Again, the same relationship was
486 observed: fiber/biomass cultivar had thicker stalks, compared with flower/seed cultivars. Between
487 2024 and 2025, in contrast to height, there was a significant difference in the stalk diameter (10.54 and
488 11.28, respectively). In 2023, the stalk diameter was, on average, 0.71−1.45 mm lower, i.e., 6−14%
489 (Table S9). Flower harvest during flowering also significantly reduced the stalk diameter by 0.74 mm
490 (7%).
491 It should be noted that stalk diameter is differentiated by spacing/inter-row width, and thus, in the
492 study by Viskovic et al. (2024), plants sown at a spacing of 0.5 m showed a significant increase in
493 thickness, compared with plants sown at a spacing of 0.125 m. Morphology is also influenced by
494 sowing density: the higher the density, the thinner the hemp stems become, with fewer side branches
495 (Fike et al., 2017). These two parameters influence plant density, which is also conditioned by other
496 environmental factors (Rehman et al., 2021; Williams et al., 2024). This was confirmed in the present
497 study, as flower harvest and year significantly differentiated the diameter (Table 4). In the current
498 study, cultivar (a characteristic independent of the environment) was divided into four homogeneous
499 groups.

Plant density was clearly the highest for the Białobrzeskie cultivar, amounting to 527,083 plants ha^{-1} (group "a"), and the lowest in Santhica 70 and Kompolti, with 169,184 and 204,774 plants ha^{-1} ("c"), respectively (Table 4). There was a significant difference between the years. In 2024, plant density was the highest (402,951 plants ha^{-1}), and in 2025, it was 35% lower. In 2023, plant density was even lower, by up to 71% (Table S9). The growing season of 2024 was, therefore, the most optimal in terms of seedling emergence. Meteorological conditions combined with plant density indicate that, under the analyzed soil conditions, the year 2023 was excessively dry, and 2025 was overly wet for industrial hemp (Tables S4 and S5). The highest plant density was achieved due to the interaction of Białobrzeskie × 2024 (647,049 plants ha^{-1}).

Sowing density differentiates plant density and, theoretically, with a sowing rate of 60 kg of seeds ha^{-1}, 188–259 plants m^{-2} can be obtained (Stramkale et al., 2024), which is almost 300–400% above the highest result obtained in the current study (with a sowing density of 15 kg of seeds ha^{-1}, Table 4). While this remains a theory, in this study 100 seeds per 1 m^2 (calculated as those germinating under laboratory conditions) were always sown, and the average plant density ranged from 16–52 plants m^{-2}, depending on the cultivar (Table 4). The maximum dispersion for a single cultivar was 21 plants m^{-2}. Therefore, it is not only sowing density but also genotype and environment that determine the final plant density. In the current study, the optimal planting density for dual-purpose hemp cultivation (stem/biomass and seeds), specified by Tang et al. (2017) as 90–150 plants m^{-2}, was not achieved. The plant densities achieved in the experiment impair the fineness and practicality of harvesting (thicker stems) (Tang et al., 2017). On the other hand, according to Deng et al. (2019), to obtain high-quality fiber yields, the optimal sowing density (target plant density) is 32–37 plants m^{-2}. Such plant densities were achieved by Henola, Santhica 27 and Finola (Table 4).

The proportion of male plants was highest in dioecious cultivars, namely Kompolti and Finola, at 32.56% (group "b") and 36.81% (group "a"), respectively (Table 4). Among monoecious cultivars, only Santhica 70, with a male-to-female plant ratio of 2.35%, was notable. This proportion may indicate incomplete stabilization of monoecy during cultivar breeding. It is possible that complete negative selection of male individuals was not implemented during this process, resulting in a relatively high degree of sex trait segregation (reversion toward dioecy) among the monoecious

528 cultivars in the experiment under analysis. In 2024–2025, the proportion of male plants in Finola was
529 32.17–41.46%, whereas in Kompolti it was 30.81–34.30% (Table 4). The driest year, 2023, deviated
530 from these ranges, with a proportion of 24.04% for Finola and 41.46% for Kompolti (Table S9).
531 Meteorological conditions during the growing season could strongly determine sex, and this was likely
532 the case in 2023, although the nature of the change in sex ratio may have depended on the cultivar
533 (Finola exhibited a reduced proportion of male individuals, whereas Kompolti showed an increased
534 proportion compared with 2024–2025).
535 For dioecious cultivars, the female-to-male plant ratio ranges from 0.7 to 1.8 (Ruzgas et al., 2024). In
536 the current study, a ratio of approximately 1.7 (Finola) to 2.1 (Kompolti) was observed (Table 4),
537 extending the aforementioned range. It should be noted that despite the presence of sex chromosomes,
538 some dioecious plants produce flowers of the opposite sex to their primary sex. This flowering
539 anomaly is determined by external factors, e.g., photoperiod (Faux et al., 2016). For this reason, the
540 indicated range may have been extended. Monoecious cultivars produce approximately 70–85%
541 female plants, although the cultivation of only one monoecious cultivar may include multiple
542 phenotypes characterized by different ratios of female to male inflorescences (Ruzgas et al., 2024).
543 This experiment involved determining the proportion of individuals who were entirely male.
544 Monoecious cultivars can be sensitive to environmental conditions and tend to revert to dioecious
545 expression under stress (Thongplew et al., 2025). Perhaps stressors, such as marginal soil conditions,
546 caused the higher percentage of male individuals in Santhica 70 (Table 5).
547 The longest development cycle was observed for Kompolti (157 days on average), whereas the
548 shortest was for Finola (107 days; Table S6). In general, cultivars classified as fiber/biomass cultivars
549 (Białobrzeskie) had a 15−50 day longer development cycle (142−157 days), compared with those
550 characterized as flower/seed cultivars (Henola, Earlina 8fc and Finola; 107−127 days). Flowering,
551 during which the flower harvest was carried out, lasted from around mid-July to around the first half
552 of September, depending on the cultivar and year (Table S10). On the other hand, the late
553 flowering/beginning of seed maturation lasted from the second half of July to the end of September
554 and was also determined by the same factors. This is an important consideration in planning the flower
555 harvest, as it depends not only on the cultivar and year but also on the phenological phase. In the

556 current study, the flowers were harvested during flowering but they can also be harvested later, e.g.,
557 during the aforementioned late flowering phase.
558
559 *3.3, Yield*
560 Biomass moisture during harvest was significantly differentiated by cultivar, year, and flower harvest
561 during the flowering period (Table 5). The average moisture content ranged from 59.30 to 64.74%,
562 depending on the cultivar. The difference between the Finola cultivar, which contained the most water
563 during harvest, and the Henola cultivar, which contained the least water, was 5.44 pp. In contrast, the
564 seasonal differences were 7.08 pp. The biomass, from which flowers were harvested during flowering,
565 exhibited a significantly higher moisture content (by 2.3 pp), compared with biomass without flower
566 harvest. Flower harvest during flowering resulted in intensive development of side shoots and flowers
567 at the tops of industrial hemp plants, and therefore the tops of these plants could have contained more
568 water.
569 The obtained range of average moisture for cultivars (Table 5) was similar to the average for nine
570 cultivars harvested when the first mature seed appeared, which ranged from 60.8 to 70.6%, depending
571 on the year (Jankauskiene and Gruzdeviene, 2015). The noticeably higher upper limit may result from
572 the earlier harvest time in the study by Jankauskiene and Gruzdeviene (2015). In contrast, in hemp
573 cultivation for fiber, biomass moisture content was 62.1−69.4% (Jasinskas et al., 2020), with this
574 biomass moisture content also being higher compared with the range in the current study. Hemp for
575 fiber is harvested earlier, so this was not surprising. Prade et al. (2011) report that such hemp biomass
576 moisture content is not an obstacle to biogas production but must be reduced if storage is required (due
577 to microbial degradation).
578
579 **Table 5**
580
581 The highest average biomass yield of 10.80 Mg ha^{-1} d.m. was observed for Kompolti (Table 5), i.e.,
582 the cultivar with the longest development cycle (Table S6). The yield of this cultivar was also the least
583 stable, as expressed by a standard deviation of 4.48 Mg ha^{-1} d.m. Białobrzeskie and Santhica 70

584 (10.60 and 10.05 Mg ha^{-1} d.m.) were also included in the same homogeneous group "a". The lowest
585 yields were observed for cultivars with the shortest development cycles (107–127 days), namely
586 Finola, Earlina 8fc, and Henola. The yields of these three cultivars were 45–69% lower than that of
587 Kompolti. A similar relationship was observed in the extremely dry conditions of the 2023 growing
588 season (Table S11), with Kompolti yield at that time less than 48% of the average for 2024–2025.
589 Considering all three years of the study, Kompolti also achieved the highest yield among the cultivars
590 in 2024, with 14.23 Mg ha^{-1} d.m. In 2023, the average yield, regardless of cultivar, was 3.10 Mg ha^{-1}
591 d.m., a dramatic difference compared with 2024 and 2025 (average yields of 9.07 and 6.56 Mg ha^{-1}
592 d.m., respectively). Analysis of meteorological conditions throughout the three-year experiment
593 showed that the growing season of 2024 was optimal, while 2023 was extensively dry, and 2025
594 overly wet (Table S4 and Table S5, Fig. S1−S3). The conditions before and after sowing the seeds,
595 which determined plant emergence, were particularly important at this point. Although it might have
596 seemed paradoxical before the experiment, the flower harvest during the flowering period had no
597 significant effect on the biomass yield. Following flower harvesting, vigorous development of side
598 shoots with flower regeneration was consistently observed at the tops of industrial hemp plants, which
599 subsequently produced seeds (Fig. 1).
600 Białobrzeskie and Santhica 27 were also grown for three years in Lithuania, resulting in an average
601 annual yield of 11.34−11.61 and 10.31−11.94 Mg ha^{-1} d.m., respectively (Jankauskiene &
602 Gruzdeviene, 2015). In the current study, yield fluctuations were greater, with yields varying by
603 cultivar and year (8.58–12.63 and 8.07–8.20 for Białobrzeskie and Santhica 27, respectively; Table 5),
604 most likely due to poorer soil conditions (marginal soil). In eastern Canada, eleven industrial hemp
605 cultivars were grown, including Finola, with yields ranging from 0.46 to 2.89 Mg ha^{-1} d.m., depending
606 on the year and site. On a similar sandy soil site with the same nitrogen fertilization dose, a biomass
607 yield of 0.61 Mg ha^{-1} d.m. was obtained (Aubin et al., 2016). This is considerably lower than the yield
608 of 2.07–4.73 Mg ha−1 d.m. obtained with Finola in the current study (years 2024–2025; Table 5). A
609 similar yield (0.69 Mg ha^{-1} d.m., Table S11) was obtained only in 2023, when emergence was
610 drastically reduced due to soil drought caused by lack of rainfall. A similar Finola biomass yield,
611 falling within the above range, was obtained by Jasinskas et al. (2020), i.e., 3.25−3.41 Mg ha−1 d.m.

(cultivation for fiber). Hemp has the potential to grow under limited or variable humidity conditions, with a relatively low water requirement of 220-450 mm, compared with other fiber crops (Gill et al., 2023). In the current study, the total precipitation in each season (2023−2025) met this requirement (Table S5), but the decisive factor was not the total precipitation during the season, but rather its temporal distribution, which was well reflected in 2023 (Fig. S1).

Fig. 1

3.4. Total yield

The earlier "removal" of flowers during flowering from the field resulted in the average total biomass yield being the highest for the Kompolti cultivar – 11.04 Mg ha^{-1} d.m. (Table 6). Similarly, the Białobrzeskie and Santhica 70 cultivars were also included in the same homogeneous group "a" (10.96 and 10.25 Mg ha^{-1} d.m., respectively). As was the case with biomass yield, Finola, Henola, and Earlina 8fc formed a group characterized by the lowest total biomass yields (44−68% less than for Kompolti). Flower harvest did not significantly differentiate total biomass yield in this case, although when analyzing the Cultivar × Flower harvest interaction separately, most cultivars with flower harvest were characterized by higher yield.

Considering the flower harvest slightly increased the total biomass yield relative to the biomass yield, from approximately 2% (Santhica 70 and Kompolti) to 5% (Henola and Finola) (Table 6). Total biomass yields were still significantly lower compared with the cultivation of the same cultivars, including in Poland, where the biomass yields of Earlina 8fc, Henola, Białobrzeskie, Kompolti and Finola amounted to 16.76, 14.85, 25.14, 30.09 and 8.57 Mg ha^{-1}, respectively (Wawro et al., 2025). The difference was probably due to marginal soil and lower sowing density (15−29 vs 40 kg ha^{-1}). For example, Białobrzeskie was sown at 15 kg ha^{-1}producing a total biomass yield of 10.96 Mg ha^{-1} d.m. This yield is comparable with the cultivation of Białobrzeskie in another part of Poland with the same sowing density (12.39 Mg ha^{-1} at an 18% moisture content, i.e., 10.16 Mg ha^{-1} dry matter; harvest at the end of seed setting) (Kołodziej et al., 2023).

639 The total essential oil yield, which is the sum of the oil yield from flowers and bioconcentrate,
640 irrespective of the year and flower harvest, was significantly the highest for Białobrzeskie, Henola,
641 Kompolti and Earlina 8fc (1.20–1.59 L ha^{-1}) (Table 6). In 2024, the total essential oil yield was
642 significantly higher than that in 2025 (1.47 vs 0.84 L ha^{-1}). Flower harvest during the flowering period
643 resulted in a significantly higher essential oil yield (by 165%) without affecting biomass yield or total
644 biomass yield. The Cultivar × Flower harvest interaction revealed that the highest average total
645 essential oil yield was obtained from cultivars harvested during flowering, namely Białobrzeskie,
646 Henola and Kompolti (2.08–2.39 L ha^{-1}).
647 These results show that using threshing residue as a by-product can increase essential oil yield on
648 marginal soils. A similar conclusion was reached by Sieger et al. (2025) following the valorization and
649 yield determination of hemp infructescence. This reinforces the concept of hemp multifunctionality by
650 fully utilizing the available inflorescence pool, including bioconcentrate, for the production of
651 essential oils (Bertoli et al., 2010). Nevertheless, compared with considerably better growing
652 conditions, the total essential oil yield may still be lower. The average total essential oil yield never
653 exceeded 2.39 L ha^{-1} (section C × F in Table 6), which showed that under more optimal conditions,
654 including soil and meteorological ones, a comparable or higher essential oil yield can be obtained from
655 the flowers alone, e.g. 2.4 L ha^{-1} (Vuerich et al., 2019) or 3.96–4.80 L ha^{-1} (Baldini et al., 2018). It
656 should be emphasized that the composition of essential oil from two different raw materials may be
657 significantly different, and this should be addressed in future research.
658 The average seed yield in 2024 was 0.52 Mg ha^{-1}, whereas in 2025 it was 46% lower (Table 6).
659 Despite dry conditions in 2023 (Fig. S1) and reduced seed yield, the 2023 yield was 21% lower than in
660 2024 (Table S12). This indicates that industrial hemp plants can reduce total biomass yield (in 2023,
661 by an average of 53–66% relative to 2024–2025), thereby ensuring reproduction. The highest average
662 seed yield was obtained from two flower/seed cultivars, namely Henola (0.89 Mg ha^{-1}) and Finola
663 (0.76 Mg ha^{-1}) (group "a"). Flower harvesting, despite having no effect on biomass/total biomass
664 yield, increased total essential oil yield and significantly reduced seed yield by approximately 14%.
665 Broken down into all cases of the Cultivar × Year interaction, the highest seed yield was obtained
666 from the Henola and Finola cultivars in 2024 (1.34 and 1.27 Mg ha^{-1}, group "a"). Throughout the

667 three-year experiment period, avifauna feeding (Table S13, Fig. S4-S13) on industrial hemp was
668 observed, beginning at the end of August, i.e., at the end of the breeding season of common breeding
669 birds in Poland. This was also the time when most of the other species cultivated in the buffer zone
670 around the hemp crop had already been harvested/cleared. Bird infestation persisted until the very end
671 of plant harvest, and birds settled on the hemp plants when the bracts were only beginning to fill (the
672 seeds were forming, and the bracts were internally at the "milk" stage of seed development).
673 Additionally, the experiment was located approximately 100 m from farm buildings that served as
674 breeding habitat for birds flying into the experimental field. It is worth noting, however, that the
675 experimental plots in the current study covered a total area of 604.8 m^2. Feeding by several flocks of
676 birds, each numbering several dozen individuals, during the season would not cause such losses in
677 commercial industrial hemp cultivation (covering a much larger area) as in the case of experimental
678 cultivation.
679 Nevertheless, the current study confirmed that seed production was higher in early-flowering
680 genotypes (Henola, Earlina 8fc, and Finola) than in later-flowering genotypes (Białobrzeskie, Santhica
681 27, Santhica 70, and Kompolti). The same relationship was reported by Campiglia et al. (2017). The
682 lowest average seed yields were recorded for Santhica 27 and 70 (approximately 0.08 Mg ha^{-1}, both).
683 However, in other experiments, even lower seed yields were observed, including for Santhica 27
684 (0.01−0.02 Mg ha^{-1}) (Campiglia et al., 2017). For the Polish cultivars Białobrzeskie and Henola,
685 typical seed yields of 0.8−1.0 and 1.5−2.1 Mg ha^{-1}, respectively, are reported (Teleszko et al., 2022).
686 In this experiment, the average values for cultivars were 0.29 and 0.89 Mg ha^{-1} (Table 6), respectively.
687 The lower yield is certainly due to recorded bird feeding, whereas the second factor is marginal soil.
688 Regarding the significant impact of the year on seed yield, Tsaliki et al. (2021) also reported this
689 finding.
690 In the current study, the strongest significant correlations in terms of total yield and biometrics (> 0.6
691 absolute) occurred between the height and diameter (0.80), total biomass yield and height (0.71), seed
692 yield and height (−0.66), and plant density and diameter (−0.65) (Fig. 2). Overall, taller cultivars had
693 thicker shoots and a significantly higher total biomass yield, while lower cultivars produced more
694 seeds. It was also found that increasing the plant density decreased shoot diameters.

695

696 **Fig. 2**

697

698 *3.5. Cultivar profiles*

699 The Cultivar × Flower harvest interaction revealed a clear division of cases into two main clusters
700 (Fig. 3). This indicated the existence of two distinct multidimensional profiles in the analyzed set of all
701 obtained results, with the separation of the two main branches occurring at a relatively large binding
702 distance (approximately 60 and 70 D/D_{max}). The differences between these two groups were
703 significant compared with the intra-group variability.

704

705 **Fig. 3**

706

707 The first cluster included combinations relating to the Białobrzeskie, Santhica 27, Santhica 70 and
708 Kompolti cultivars (fiber/biomass cultivars with a longer development cycle), with both variants with
709 flower harvest during flowering (marked "_H") and without flower harvest occurring within this
710 group. The second cluster grouped the Henola, Earlina 8fc, and Finola cultivars (described as
711 flower/seed cultivars with a shorter development cycle), including both variants ("_H" and without).
712 Santhica 27 and Santhica 70, as well as Henola and Earlina 8fc, were most similar to each other in
713 both variants (with and without flower harvest).
714 In summary, cultivar identity (genotypic factor) was the dominant factor influencing the overall
715 pattern of similarities, whereas flower harvest modified the profiles of individual cultivars but
716 generally did not eliminate differences attributable to genotype.
717 In agricultural practice, choosing a universal cultivar that balances biomass, essential oil, and seed
718 yields is intriguing. Some farmers may prioritize maximizing oil and biomass yields, while others may
719 focus on maximizing seed yield, even at the expense of biomass..
720 Following PCA analysis of the three key yield parameters, the biomass-essential oil-seed compromise
721 was provided, first, by Henola with flower harvest, and, second, by Earlina with flower harvest (Fig.
722 4). These were cultivars characterized by lower height, often referred to as flower/seed cultivars with a

723 short development cycle. The first was a Polish cultivar, and the second was a French cultivar.
724 Specialization in the extraction of essential oils and biomass was provided by Białobrzeskie and
725 Kompolti, with flower harvests (tall cultivars, referred to as fiber/biomass cultivars with a long
726 development cycle). On the other hand, maximization of seed yield with reduced biomass (and
727 ensuring a non-zero essential oil yield) was achieved by Henola without flower harvest, and by Finola
728 with flower harvest.
729
730 **Fig. 4**
731
732 When selecting cultivars for a specific cultivation type, it is also important to consider the effects of
733 the year and the Cultivar × Year interaction, which can both increase and decrease individual
734 parameters. The individual contribution of the year to the variability in total yield and biometrics was
735 at most 13%, which was the case for total essential oil yield (Fig. 5). The impact of the Cultivar ×
736 Year interaction showed similar orders of magnitude, with one exception, namely seed yield, where
737 the impact of this interaction was 34%. This means that the impact of the year on seed yield may be
738 cultivar-dependent.
739
740 **Fig. 5**
741
742 *3.6. Cannabidiol and tetrahydrocannabinol content prediction*
743 The phenological stage significantly differentiated the predicted CBD content of industrial hemp. The
744 significantly lowest average content was noted during the flowering period (2.16% d.m.) (Table 7),
745 when white stigmas were visible within the bracts (Fig. 6). This was followed by a significant increase
746 of approximately 58%, to 3.42% d.m., during the late flowering stage. During the seed-ripening phase,
747 the CBD content averaged 2.90% d.m. This represented a significant decrease of approximately 15%
748 compared with the late-flowering stage but was still significantly higher, by approximately 34%, than
749 in the flowering phase.
750

Fig. 6

CBD prediction revealed a range of average contents in a particular phase, depending on the cultivar: 1.76–2.68% d.m. for flowering; 2.81–4.64% d.m. for late flowering; and 2.31–3.98% d.m. for seed ripening (Table 7). One should be aware that, when the flowering phase is used as the reference point, samples for the late-flowering phase were not collected at the same time interval (i.e., the number of days from flowering) for each cultivar, or for the same cultivars across different years (Table S10). Sample collection for late-flowering traits occurred 5–36 days after flowering, depending on the cultivar and year. Therefore, cultivars from which samples for late flowering were collected later, could be characterized by a higher predicted CBD content, even though the phase was the same for all cultivars (late flowering). The time interval between late flowering and seed ripening is much longer than that between flowering and late flowering. During late flowering, among other changes, the density of whitish pubescence formed by trichomes increased, and the volume of the bracts also increased, which may have influenced the predicted CBD content. This is confirmed by a study by Yang et al. (2020), which found that the total concentration of CBD or THC increased significantly with flower maturation, peaking within a few weeks post-anthesis. The diversity of cultivars further emphasizes that the number, development, and degree of maturation of capitate trichomes are influenced by the plant genotype and age (Punja et al., 2023). In contrast, an overall decrease in CBD during seed ripening is typical, as after a plateau period of varying length for different cultivars, peak cannabinoid concentrations decline as the plants age (Yang et al., 2020).

Individual flowering or seed-ripening phases were more morphologically distinct and not evenly distributed over time. Kompolti showed the highest average predicted CBD content during the flowering period (2.68% d.m.), whereas Białobrzeskie during the late flowering phase (4.64% d.m.), and Earlina 8fc during the seed ripening period (3.98% d.m.). As regards THC, its average content was the lowest during the flowering period (0.11% d.m., group “a”). However, it was the significantly highest during the late-flowering and seed-ripening periods (both at 0.16% d.m., “b”). The average THC content never exceeded the 0.3% threshold, thus fulfilling the definition of industrial hemp, which is strictly regulated by law, including in the Farm Bill (Bajwa et al., 2024).

779 Dreger et al. (2023) determined the CBD and CBDA contents of 17 different genotypes of
780 inflorescences collected at the beginning of the seed maturation stage, obtaining a total of 0.53-5.07%
781 d.m. This fell within the late flowering phase in the current study, where the content range was 2.81-
782 4.64% d.m. depending on the cultivar (Table 7), and thus fell within the aforementioned range. In
783 another study, at the seed-ripening stage (BBCH 87), the CBD content was 2.41% d.m. for Codimono
784 and 2.75% d.m. for the Fibrante cultivar (Pieracci, 2023). In the current study, a similar predicted
785 result was obtained during the seed ripening phase (BBCH 81) for Santhica 70 (2.31% d.m.), Henola
786 (2.40% d.m.), Białobrzeskie (2.49% d.m.), and Santhica 27 (2.71% d.m.) (Table 7). In the essential oil
787 from Felina 32 cultivar inflorescences, the CBD concentration was 4.9% (inflorescences were
788 harvested at the end of July, with the phenological phase undefined) (Fiorini et al., 2019), which was
789 similar to the predicted content for the flowering phase (2.81−4.64% d.m., Table 7) in the current
790 study. However, it should be noted that hydrodistillation is not an effective method for transferring
791 CBD (which is not very volatile and tends to remain in plant material) (Zheljazkov & Maggi, 2021),
792 and, therefore, this content may have been underestimated compared with the content in the
793 inflorescences from which the oil was extracted. Agricultural techniques can also lead to variations;
794 for instance, fertilization increased the CBD content in inflorescences (Wei et al., 2023).
795
796 **4. Conclusions**
797 Under marginal soil conditions in north-eastern Poland, industrial hemp performance in a multi-output
798 production concept (biomass–flowers/essential oil –seed) was primarily governed by genotype, with
799 modulation by seasonal weather. The markedly poor establishment in 2023 (associated with drought at
800 emergence) resulted in a substantial reduction of outputs, indicating that season hydrothermal
801 conditions are a critical risk factor for hemp grown on low-quality soils.
802 Across seasons, flower dry matter yield peaked in 2024 (0.53 Mg ha^{-1} d.m.) and declined markedly in
803 2025 and 2023, indicating high sensitivity of the floral fraction to unfavorable early-season conditions
804 on light, acidic soils. Cultivar differences were pronounced: Białobrzeskie produced the highest flower
805 yield (0.71 Mg ha^{-1}), whereas Finola had the lowest (0.35 Mg ha^{-1}). Essential oil yield from flowers
806 reflected the combined effect of flower biomass and oil concentration; the highest mean flower

807 essential oil yield was obtained in Białobrzeskie (1.73 L ha^{-1}), while Santhica 27 was the least
808 productive for this trait.
809 A key applied outcome is that manual flower harvest at flowering increased system-level essential oil
810 output without significantly affecting biomass production. Specifically, flower harvest increased total
811 essential oil yield (sum of oils from flowers and bioconcentrate) by 165%, while biomass yield and
812 total biomass yield did not differ significantly, supporting the feasibility of dual-purpose management
813 on marginal sites. The highest total essential oil yields were recorded for Białobrzeskie, Henola and
814 Kompolti (2.08–2.39 L ha^{-1}). A clear year effect was also observed, with 2024 outperforming 2025
815 (mean across cultivars: 1.47 vs 0.84 L ha^{-1}).
816 The bioconcentrate (threshing residue) emerged as a relevant co-product whose quantity and essential
817 oil yield were cultivar-dependent, and whose oil yield was additionally shaped by cultivar × year
818 interactions, highlighting the importance of matching genotype and seasonality when valorizing
819 processing residues. However, it should be emphasized that essential oils derived from flowers and the
820 bioconcentrate differ in chemical composition and quality, which should be determined in future
821 studies.
822 Multivariate analysis separated cultivars into coherent functional groups (biomass-type vs flower/seed-
823 type cultivars) and showed that, despite flower harvest-induced shifts, genotype remained the
824 dominant driver of overall performance profiles. For balanced multi-output production (essential oil,
825 seed and biomass), Henola and Earlina 8fc with flower harvest were the most promising choices. For
826 maximizing essential oil plus biomass, Białobrzeskie and Kompolti with flower harvest were
827 preferred, whereas seed-oriented strategies were best represented by Henola without flower harvest
828 and Finola with flower harvest.
829 The results of this study may be applicable not only to industrial hemp producers at similar latitudes,
830 but also to growers worldwide aiming to cultivate hemp on marginal soils. In future studies, it would
831 be worth verifying how a later flower harvest (particularly during the late flowering phase) affects
832 total essential oil yield, seed yield and total biomass yield. In the present study, flowers was harvested
833 at flowering, when the bracts are still relatively small and have a low trichome density. Future work
834 should also place greater emphasis on the multi-purpose nature of hemp and, in addition to the three

yield parameters considered here, include stalk yield partitioned into fibre and hurd (shives) yields. It would also be advisable to protect hemp plants against bird feeding on bracts/seeds.

Acknowledgements

This research results from a study carried out at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, topic number 30.610.007-110. This research was funded in part by National Science Centre, Poland, grant number 2023/49/N/NZ9/02813. For the purpose of Open Access, the author has applied a CC-BY public copyright licence to any Author Accepted Manuscript (AAM) version arising from this submission. The project was supported by the Minister of Science under the "Regional Initiative of Excellence Program", RID/SP/0025/2024/01. The author would also like to thank the staff of the Department of Genetics Plant Breeding and Bioresource Engineering for their technical support during the experiment.

CRediT authorship contribution statement

Paweł Dudziec: Conceptualization; Methodology; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data curation; Writing - original draft; Writing - review & editing; Visualization; Supervision; Project administration; **Mariusz Jerzy Stolarski**: Validation; Formal analysis; Writing - review & editing; Supervision; Project administration; Funding acquisition.

References

Abdollahi, M., Sefidkon, F., Calagari, M., Mousavi, A., Mahomoodally, M.F., 2020. Impact of four hemp (Cannabis sativa L.) varieties and stage of plant growth on yield and composition of essential oils. Ind. Crops Prod. 155. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112793

Addo, P.W., Gariepy, Y., Shearer, M., Taylor, N., MacPherson, S., Raghavan, V., Orsat, V., Lefsrud, M., 2024. Microwave-assisted hot air drying of Cannabis sativa: Effect of vacuum and pre-

862 freezing on drying kinetics and quality. Ind. Crops Prod. 218.
863 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119015

864 Ascrizzi, R., Ceccarini, L., Tavarini, S., Flamini, G., Angelini, L.G., 2019. Valorisation of hemp
865 inflorescence after seed harvest: Cultivation site and harvest time influence agronomic
866 characteristics and essential oil yield and composition. Ind. Crops Prod. 139.
867 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111541

868 Assirelli, A., Santangelo, E., Stagno, F., Roccuzzo, G., Musio, S., Amaducci, S., 2022. Hemp Sowing
869 Seed Production: Assessment of New Approaches in North-Italy. Sustainability (Switzerland) 14.
870 https://doi.org/10.3390/su142417020

871 Aubin, M.P., Seguin, P., Vanasse, A., Lalonde, O., Tremblay, G.F., Mustafa, A.F., Charron, J.B.,
872 2016. Evaluation of eleven industrial hemp cultivars grown in Eastern Canada. Agron. J. 108,
873 1972–1980. https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0217

874 Bajwa, P., Saini, R., Singh, S., Makkar, J., Trostle, C., Singh, H., 2025a. Effect of early and late post
875 emergence herbicides on weed suppression, crop injury, and biomass yield of industrial hemp in
876 semiarid conditions. Agrosystems, Geosciences and Environment 8.
877 https://doi.org/10.1002/agg2.70078

878 Bajwa, P., Singh, S., Kafle, A., Saini, R., Trostle, C., 2025b. Effect of planting dates and seeding
879 densities on growth, physiology, and yield of industrial hemp. Crop Sci. 65.
880 https://doi.org/10.1002/csc2.70017

881 Bajwa, P., Singh, S., Kafle, A., Saini, R., Trostle, C., 2025c. Effect of planting dates and seeding
882 densities on growth, physiology, and yield of industrial hemp. Crop Sci. 65.
883 https://doi.org/10.1002/csc2.70017

884 Bajwa, P., Singh, S., Singh, M., Kafle, A., Parkash, V., Saini, R., 2023. Assessing the production
885 potential of industrial hemp in the semi-arid west Texas. Technology in Agronomy 3.
886 https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0017

887 Baldini, M., Ferfuia, C., Piani, B., Sepulcri, A., Dorigo, G., Zuliani, F., Danuso, F., Cattivello, C.,
888 2018. The performance and potentiality of monoecious hemp (cannabis sativa l.) cultivars as a
889 multipurpose crop. Agronomy 8. https://doi.org/10.3390/agronomy8090162

890 Bertoli, A., Tozzi, S., Pistelli, L., Angelini, L.G., 2010. Fibre hemp inflorescences: From crop-residues
891 to essential oil production. Ind. Crops Prod. 32, 329–337.
892 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.05.012

893 Blandinières, H., Amaducci, S., 2022a. Adapting the cultivation of industrial hemp (Cannabis sativa
894 L.) to marginal lands: A review. GCB Bioenergy. https://doi.org/10.1111/gcbb.12979

895 Blandinières, H., Amaducci, S., 2022b. Adapting the cultivation of industrial hemp (Cannabis sativa
896 L.) to marginal lands: A review. GCB Bioenergy. https://doi.org/10.1111/gcbb.12979

897 Brar, K.K., Raheja, Y., Chadha, B.S., Magdouli, S., Brar, S.K., Yang, Y.H., Bhatia, S.K., Koubaa, A.,
898 2024. A paradigm shift towards production of sustainable bioenergy and advanced products from
899 Cannabis/hemp biomass in Canada. Biomass Convers. Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-
900 022-02570-6

901 Burczyk, H., Grabowska, L., Strybe, M., Konczewicz, W., 2009. Effect of sowing density and date of
902 harvest on yields of industrial hemp. Journal of Natural Fibers 6, 204–218.
903 https://doi.org/10.1080/15440470902972588

Burgel, L., Hartung, J., Pflugfelder, A., Graeff-Hönninger, S., 2020. Impact of growth stage and biomass fractions on cannabinoid content and yield of different hemp (Cannabis sativa L.) genotypes. Agronomy 10. https://doi.org/10.3390/agronomy10030372

Campbell, B.J., Berrada, A.F., Hudalla, C., Amaducci, S., McKay, J.K., 2019. Genotype × Environment Interactions of Industrial Hemp Cultivars Highlight Diverse Responses to Environmental Factors. Agrosystems, Geosciences and Environment 2, 1–11. https://doi.org/10.2134/age2018.11.0057

Campiglia, E., Radicetti, E., Mancinelli, R., 2017. Plant density and nitrogen fertilization affect agronomic performance of industrial hemp (Cannabis sativa L.) in Mediterranean environment. Ind. Crops Prod. 100, 246–254. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.022

Ceyhan, V., Türkten, H., Yıldırım, Ç., Canan, S., 2022. Economic viability of industrial hemp production in Turkey. Ind. Crops Prod. 176, 114354. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114354

Chen, C., Wongso, I., Putnam, D., Khir, R., Pan, Z., 2021. Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (Cannabis sativa L.). Ind. Crops Prod. 172, 114051. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051

Chiluwal, A., Sandhu, S.S., Sandhu, H., Irey, M., Johns, F., Sanchez, R., 2023. Cannabidiol industrial hemp growth, biomass, and temporal cannabinoids accumulation under different planting dates in southern Florida. Agrosystems, Geosciences and Environment 6. https://doi.org/10.1002/agg2.20347

de Melo, M.M.R., Águas, F., Nascimento, J., 2023. Tray drying of medical cannabis inflorescences at industrial scale: Kinetics measurement and modeling towards the implementation of statistical process control. Ind. Crops Prod. 201, 116968. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116968

De Vos, B., De Souza, M.F., Michels, E., Meers, E., 2023. Industrial hemp (Cannabis sativa L.) field cultivation in a phytoattenuation strategy and valorization potential of the fibers for textile production. Environmental Science and Pollution Research 30, 41665–41681. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25198-z

Deng, G., Du, G., Yang, Y., Bao, Y., Liu, F., 2019. Planting Density and Fertilization Evidently Influence the Fiber Yield of Hemp (Cannabis sativa L.). Agronomy 9. https://doi.org/10.3390/agronomy9070368

Dreger, M., Szalata, M., Górska-Paukszta, M., Mańkowska, G., Oleszak, G., Kwiatkowska, E., Ożarowski, M., 2023. Content of cannabinoids in clonally propagated industrial hemp. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2245968

Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Ind. Crops Prod. 235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800

Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2024. Industrial Hemp As a Multi-Purpose Crop: Last Achievements and Research in 2018−2023. Journal of Natural Fibers. https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2369186

Duong, H., Pearson, B., Anderson, S., Berthold, E., Kjelgren, R., 2023. Variation in Hydric Response of Two Industrial Hemp Varieties (Cannabis sativa) to Induced Water Stress. Horticulturae 9. https://doi.org/10.3390/horticulturae9040431

946 Duque Schumacher, A.G., Pequito, S., Pazour, J., 2020. Industrial hemp fiber: A sustainable and
947 economical alternative to cotton. J. Clean. Prod. 268, 122180.
948 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122180

949 Faux, A.M., Draye, X., Flamand, M.C., Occre, A., Bertin, P., 2016. Identification of QTLs for sex
950 expression in dioecious and monoecious hemp (Cannabis sativa L.). Euphytica 209, 357–376.
951 https://doi.org/10.1007/s10681-016-1641-2

952 Fike, J., 2016. Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop. CRC. Crit. Rev. Plant
953 Sci. 35, 406–424. https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1257842

954 Fiorini, D., Molle, A., Nabissi, M., Santini, G., Benelli, G., Maggi, F., 2019. Valorizing industrial
955 hemp (Cannabis sativa L.) by-products: Cannabidiol enrichment in the inflorescence essential oil
956 optimizing sample pre-treatment prior to distillation. Ind. Crops Prod. 128, 581–589.
957 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.045

958 Giannoulis, K.D., Bartzialis, D., Gintsioudis, I., Danalatos, N.G., 2024. Cultivation Practices Affect
959 Biomass Yield and Quality of "Felina 32", an Industrial Hemp Variety. Agronomy 14.
960 https://doi.org/10.3390/agronomy14112743

961 Gill, A.R., Loveys, B.R., Cavagnaro, T.R., Burton, R.A., 2023. The potential of industrial hemp
962 (Cannabis sativa L.) as an emerging drought resistant fibre crop. Plant Soil.
963 https://doi.org/10.1007/s11104-023-06219-9

964 Gill, A.R., Loveys, B.R., Cowley, J.M., Hall, T., Cavagnaro, T.R., Burton, R.A., 2022. Physiological
965 and morphological responses of industrial hemp (Cannabis sativa L.) to water deficit. Ind. Crops
966 Prod. 187, 115331. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115331

967 Hammami, N., Privé, J.-P., Moreau, G., 2022. Spatiotemporal variability and sensitivity of industrial
968 hemp cultivars under variable field conditions. European Journal of Agronomy 138, 126549.
969 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126549

970 Islam, M.M., Rengel, Z., Storer, P., Siddique, K.H.M., Solaiman, Z.M., 2023. Microbial consortium
971 inoculant and rock mineral fertiliser differentially improved yield and nutrient uptake of
972 industrial hemp (Cannabis sativa L.) varieties. Ind. Crops Prod. 197, 116599.
973 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116599

974 Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., 2015. Screening of Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) Cultivars
975 for Biomass Yielding Capacities in Lithuania. Journal of Natural Fibers 12, 368–377.
976 https://doi.org/10.1080/15440478.2014.929556

977 Jasinskas, A., Streikus, D., Vonžodas, T., 2020. Fibrous hemp (Felina 32, USO 31, Finola) and fibrous
978 nettle processing and usage of pressed biofuel for energy purposes. Renew. Energy 149, 11–21.
979 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.007

980 Ji, A., Jia, L., Kumar, D., Yoo, C.G., 2021. Recent advancements in biological conversion of industrial
981 hemp for biofuel and value-added products. Fermentation.
982 https://doi.org/10.3390/fermentation7010006

983 Kaur, N., Griffin, W., Sandhu, A., Sidhu, S., Brym, Z., Sharma, L., 2024. Nitrogen application and
984 cultivar effects on industrial hemp yield dynamics. Agron. J. 116, 727–736.
985 https://doi.org/10.1002/agj2.21537

986 Kołodziej, J., Pudełko, K., Mańkowski, J., 2023. Energy and Biomass Yield of Industrial Hemp
987 (Cannabis sativa L.) as Influenced by Seeding Rate and Harvest Time in Polish Agro-Climatic
988 Conditions. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159609

989 Mahou, Y., Marrakchi Ben Jaafar, D., Al Moudani, N., Jeddi, M., Chda, A., Fettoukh, N., Benbrahim,
990 K.F., Aarab, L., El Bouri, A., Stambouli, H., Bencheikh, R., 2025. Chemical profile and
991 bioactive properties of Cannabis sativa threshing residue: Vasorelaxant, antioxidant,
992 immunomodulatory, and antibacterial activities. Journal of HerbMed Pharmacology 14, 29–42.
993 https://doi.org/10.34172/jhp.2025.51481

994 Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., Soldati, A., 1998. Decimal code for growth
995 stages of hemp (Cannabis sativa L.), SOURCE: JOURNAL OF THE INTERNATIONAL HEMP
996 ASSOCIATION.

997 Menghini, L., Ferrante, C., Carradori, S., D'antonio, M., Orlando, G., Cairone, F., Cesa, S., Filippi, A.,
998 Fraschetti, C., Zengin, G., Ak, G., Tacchini, M., Iqbal, K., 2021. Chemical and bioinformatics
999 analyses of the anti-leishmanial and anti-oxidant activities of hemp essential oil. Biomolecules
1000 11, 1–17. https://doi.org/10.3390/biom11020272

1001 Mishchenko, S., Mokher, J., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., Dudukova, S., n.d. Phenological
1002 growth stages of hemp (Cannabis sativa L.): codification and description according to the BBCH
1003 scale.

1004 Ortmeier-Clarke, H.J., Laboski, C.A.M., Oliveira, M.C., Arneson, N.J., Conley, S.P., Werle, R., 2023.
1005 Cultivar and management effects on industrial hemp yields in Wisconsin. Agron. J. 115, 1335–
1006 1343. https://doi.org/10.1002/agj2.21297

1007 Pavlovic, R., Panseri, S., Giupponi, L., Leoni, V., Citti, C., Cattaneo, C., Cavaletto, M., Giorgi, A.,
1008 2019. Phytochemical and Ecological Analysis of Two Varieties of Hemp (Cannabis sativa L.)
1009 Grown in a Mountain Environment of Italian Alps. Front. Plant Sci. 10.
1010 https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01265

1011 Pieracci, Y., Ascrizzi, R., Terreni, V., Pistelli, L., Flamini, G., Bassolino, L., Fulvio, F., Montanari,
1012 M., Paris, R., 2021. Essential oil of cannabis sativa l: Comparison of yield and chemical
1013 composition of 11 hemp genotypes. Molecules 26. https://doi.org/10.3390/molecules26134080

1014 Pieracci, Y., Fulvio, F., Isca, V., Pistelli, L., Bassolino, L., Montanari, M., Moschella, A., Flamini, G.,
1015 Paris, R., 2023. The phenological stage of hemp inflorescences affects essential oil yield and its
1016 chemical composition. Ind. Crops Prod. 197. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116605

1017 Prade, T., Svensson, S.-E., Andersson, A., Mattsson, J.E., 2011. Biomass and energy yield of
1018 industrial hemp grown for biogas and solid fuel. Biomass Bioenergy 35, 3040–3049.
1019 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.006

1020 Punja, Z.K., Sutton, D.B., Kim, T., 2023. Glandular trichome development, morphology, and
1021 maturation are influenced by plant age and genotype in high THC-containing cannabis (Cannabis
1022 sativa L.) inflorescences. J. Cannabis Res. 5. https://doi.org/10.1186/s42238-023-00178-9

1023 Rahemi, A., Dhakal, R., Temu, V.W., Rutto, L., Kering, M.K., 2021. Performance of different-use
1024 type industrial hemp cultivars under mid-atlantic region conditions. Agronomy 11.
1025 https://doi.org/10.3390/agronomy11112321

1026 Rehman, M., Fahad, S., Du, G., Cheng, X., Yang, Y., Tang, K., Liu, L., Liu, F.-H., Deng, G., n.d.
1027 Evaluation of hemp (Cannabis sativa L.) as an industrial crop: a review.
1028 https://doi.org/10.1007/s11356-021-16264-5/Published

1029 Reinhardt, J., Hilgert, P., Von Cossel, M., 2022. Yield performance of dedicated industrial crops on
1030 low-temperature characterized marginal agricultural land in Europe – a review. Biofuels,
1031 Bioproducts and Biorefining. https://doi.org/10.1002/bbb.2314

Ruzgas, R., Tilvikienė, V., Barčauskaitė, K., Viršilė, A., Žydelis, R., 2024. Ethephon's effects on sexual expression and cannabinoid production in monoecious and dioecious varieties of hemp (Cannabis sativa L.): A field trial. Ind. Crops Prod. 210, 118064. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118064

Saragoça, A., Manuelito, C., Gallego, J.C.A., Lobón, N.C., Garrido, A.O., Cordeiro, A.I., 2026. Phenological Development and Growth Responses of Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) to Sowing Dates and Climatic Conditions in Elvas, Portugal. Agronomy 16. https://doi.org/10.3390/agronomy16020271

Scordia, D., Papazoglou, E.G., Kotoula, D., Sanz, M., Ciria, C.S., Pérez, J., Maliarenko, O., Prysiazhniuk, O., von Cossel, M., Greiner, B.E., Lazdina, D., Makovskis, K., Lamy, I., Ciadamidaro, L., Petit-dit-Grezeriat, L., Corinzia, S.A., Fernando, A.L., Alexopoulou, E., Cosentino, S.L., 2022. Towards identifying industrial crop types and associated agronomies to improve biomass production from marginal lands in Europe. GCB Bioenergy 14, 710–734. https://doi.org/10.1111/gcbb.12935

Spampinato, G., Candeliere, F., Amaretti, A., Paris, R., Montanari, M., Virzì, N., Strani, L., Citti, C., Cannazza, G., Rossi, M., Raimondi, S., 2024. A three-years survey of microbial contaminants in industrial hemp inflorescences from two Italian cultivation sites. J. Cannabis Res. 6. https://doi.org/10.1186/s42238-024-00241-z

Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., Migut, D., 2024. Influence of Foliar Application of Microelements on Yield and Yield Components of Spring Malting Barley. Agriculture (Switzerland) 14. https://doi.org/10.3390/agriculture14030505

Stramkale, V., Andze, L., Cernova, L., Teirumnieka, E., Filipova, I., Stramkalis, A., Teirumnieks, E., Andzs, M., 2024. Industrial Hemp Variety Performance in Latvia Under Baltic Sea Climate. Agronomy 14. https://doi.org/10.3390/agronomy14122750

Strzelczyk, M., Chudy, M., Łochyńska, M., Gimbut, M., Krawczyk, K., 2023. Influence of Cultivar, Harvest Date, and Selected Weather Conditions on the Essential Oils Content in Inflorescences of Hemp Cannabis sativa L. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2163332

Sugier, P., Jaros-Tsoj, K., Jaroszuk-Ściseł, J., Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., Sugier, D., Sęczyk, Ł., Plak, A., Kowalski, R., Sikorska, A.D., Vangronsveld, J., Wójcik, M., 2025. Industrial hemp Futura 75 infructescence as a source of essential oils: Micromorphology, chemical profile, and yield of essential oils. Ind. Crops Prod. 234. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121527

Sullivan, T., Yost, M., Boren, D., Creech, E., Bugbee, B., 2025. Impact of cultivar selection on floral hemp yield and cannabinoid production in the semiarid Intermountain West. Agrosystems, Geosciences and Environment 8. https://doi.org/10.1002/agg2.70125

Tang, K., Struik, P.C., Yin, X., Calzolari, D., Musio, S., Thouminot, C., Bjelková, M., Stramkale, V., Magagnini, G., Amaducci, S., 2017. A comprehensive study of planting density and nitrogen fertilization effect on dual-purpose hemp (Cannabis sativa L.) cultivation. Ind. Crops Prod. 107, 427–438. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.033

Teleszko, M., Zając, A., Rusak, T., 2022. Hemp Seeds of the Polish 'Bialobrzeskie' and 'Henola' Varieties (Cannabis sativa L. var. sativa) as Prospective Plant Sources for Food Production. Molecules 27. https://doi.org/10.3390/molecules27041448

Thongplew, P., Kangsopa, J., Hermhuk, S., Tongkoom, K., Bhuyar, P., Insalud, N., 2025. Optimizing Ethephon Concentrations for Male Plant Feminization and Enhanced Seed Yield in Dioecious

Thai Hemp (Cannabis sativa L. cv. RPF3). International Journal of Plant Biology 16. https://doi.org/10.3390/ijpb16030111

Todde, G., Carboni, G., Marras, S., Caria, M., Sirca, C., 2022. Industrial hemp (Cannabis sativa L.) for phytoremediation: Energy and environmental life cycle assessment of using contaminated biomass as an energy resource. Sustainable Energy Technologies and Assessments 52. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102081

Tsaliki, E., Kalivas, A., Jankauskiene, Z., Irakli, M., Cook, C., Grigoriadis, I., Panoras, I., Vasilakoglou, I., Dhima, K., 2021. Fibre and seed productivity of industrial hemp (Cannabis sativa l.) varieties under mediterranean conditions. Agronomy 11. https://doi.org/10.3390/agronomy11010171

Vandepitte, K., Vasile, S., Vermeire, S., Vanderhoeven, M., Van der Borght, W., Latré, J., De Raeve, A., Troch, V., 2020. Hemp (Cannabis sativa L.) for high-value textile applications: The effective long fiber yield and quality of different hemp varieties, processed using industrial flax equipment. Ind. Crops Prod. 158. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112969

Varga, I., Markulj Kulundžić, A., Krolo, P., Iljkić, D., Tišma, M., Kraus, I., 2025. Industrial Hemp Finola Variety Photosynthetic, Morphometric, Biomechanical, and Yield Responses to K Fertilization Across Different Growth Stages. Agronomy 15. https://doi.org/10.3390/agronomy15020496

Visković, J., Sikora, V., Latković, D., Zeremski, T., Dunđerski, D., Astatkie, T., Noller, J.S., Zheljazkov, V.D., 2024. Optimization of hemp production technology for fiber and seed. Ind. Crops Prod. 219, 119127. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119127

Vuerich, M., Ferfuia, C., Zuliani, F., Piani, B., Sepulcri, A., Baldini, M., 2019. Yield and quality of essential oils in hemp varieties in different environments. Agronomy 9. https://doi.org/10.3390/agronomy9070356

Wawro, A., Gieparda, W., Bujnowicz, K., Rojewski, S., Praczyk, M., 2025. Influence of Yield Structure and Chemical Composition of Monoecious and Dioecious Hemp Forms on the Efficiency of Advanced Biofuels and Biocomposite Production. Journal of Natural Fibers 22. https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2585252

Wei, X., Zhou, W., Long, S., Guo, Y., Qiu, C., Zhao, X., Wang, Y., 2023. Effects of Different N, P, and K Rates on the Growth and Cannabinoid Content of Industrial Hemp. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159605

Wielgusz, K., Praczyk, M., Irzykowska, L., Świerk, D., 2022. Fertilization and soil pH affect seed and biomass yield, plant morphology, and cadmium uptake in hemp (Cannabis sativa L.). Ind. Crops Prod. 175, 114245. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114245

Williams, A., Brym, Z., Chen, C., Collins, A., Crawford, J., Darby, H., Dedecker, J., Ellison, S., Fike, J., Gage, K., Gang, D., Griffin, J., Johnson, B., Moore, V., Ortmeier-Clarke, H., Podder, S., Richmond, M., Roozeboom, K., Thelen, K., Werle, R., Pearce, R., 2025. Comparing agronomic performance of industrial hemp varieties for suitable production in the United States. Agron. J. 117. https://doi.org/10.1002/agj2.70006

Wylie, S.E., Ristvey, A.G., Fiorellino, N.M., 2021. Fertility management for industrial hemp production: Current knowledge and future research needs. GCB Bioenergy. https://doi.org/10.1111/gcbb.12779

Yang, R., Yang, R., Berthold, E.C., McCurdy, C.R., McCurdy, C.R., Da Silva Benevenute, S., Brym, Z.T., Freeman, J.H., 2020. Development of Cannabinoids in Flowers of Industrial Hemp

(Cannabis sativa L.): A Pilot Study. J. Agric. Food Chem. 68, 6058–6064. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01211

Yazici, L., 2023. Optimizing plant density for fiber and seed production in industrial hemp (Cannabis sativa L.). J. King Saud Univ. Sci. 35. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102419

Zhang, M., Anderson, S.L., Brym, Z.T., Pearson, B.J., 2021. Photoperiodic Flowering Response of Essential Oil, Grain, and Fiber Hemp (Cannabis sativa L.) Cultivars. Front. Plant Sci. 12. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.694153

Zheljazkov, V.D., Maggi, F., 2021. Valorization of CBD-hemp through distillation to provide essential oil and improved cannabinoids profile. Sci. Rep. 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99335-4

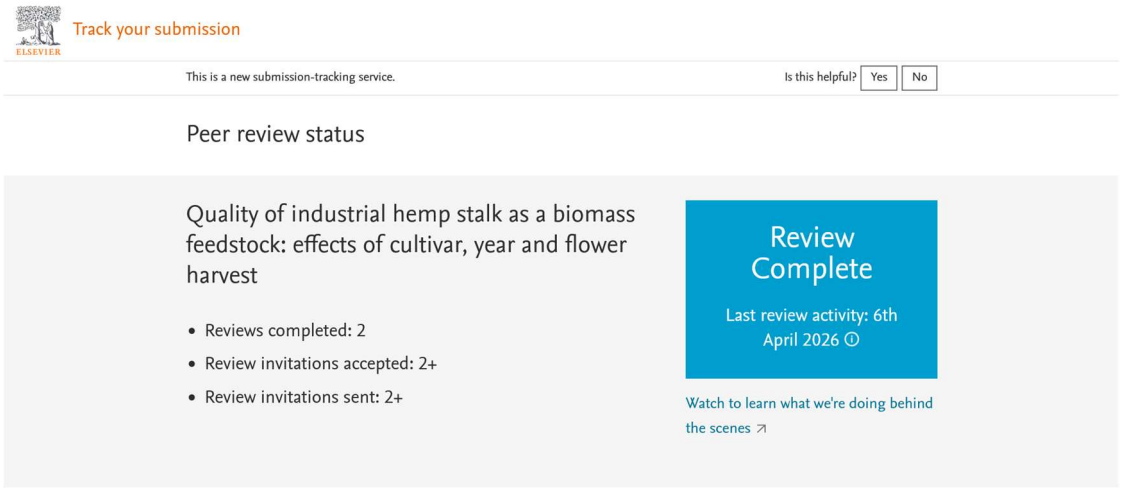
Zheljazkov, V.D., Semerdjieva, I., Sikora, V., Dincheva, I., Kačániová, M., 2025. Essential oils (EOs) composition and antimicrobial activities of novel Cannabis sativa L (Hemp) selections from Serbia. Ind. Crops Prod. 235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121615

Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Dincheva, I., Kačániová, M., Astatkie, T., Semerdjieva, I.B., Latkovic, D., 2020a. Industrial, CBD, and wild hemp: How different are their essential oil profile and antimicrobial activity? Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25204631

Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Semerdjieva, I.B., Kačániová, M., Astatkie, T., Dincheva, I., 2020b. Grinding and Fractionation during Distillation Alter Hemp Essential Oil Profile and Its Antimicrobial Activity. Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25173943

Žydelis, R., Herbst, M., Weihermüller, L., Ruzgas, R., Volungevičius, J., Barčauskaitė, K., Tilvikienė, V., 2022. Yield potential and factor influencing yield gap in industrial hemp cultivation under nemoral climate conditions. European Journal of Agronomy 139, 126576. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126576

8.3. Publikacja: Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest



Quality of industrial hemp stalk as a biomass feedstock: effects of cultivar, year and flower harvest

Paweł Dudziec[a], Mariusz J. Stolarski[a,b*]

[a] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

[b] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Centre for Bioeconomy and Renewable Energies, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

*Corresponding author's email address: mariusz.stolarski@uwm.edu.pl

Abstract

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) stalks represent an abundant by-product whose suitability for bioenergy and biorefinery pathways depends on cultivar choice and growing conditions. This study quantified the variability in physicochemical and energy-related traits of hemp stalks from a low-quality soil site in north-eastern Poland across three growing seasons (2023–2025), seven cultivars, and two cultivation variants (with and without flower harvest during blooming). A total of 126 stalk samples (42 cultivar × year × flower harvest) were analyzed for proximate and ultimate composition, higher and lower heating values, lignocellulosic fractions, and extractives, and evaluated using three-way ANOVA and multivariate methods. Stalks exhibited high moisture at harvest (61.38 ± 6.21%), moderate ash content (3.41% d.m. (dry matter)), and stable volatile matter and fixed carbon contents (76.11 and 20.49% d.m., respectively). The energy potential was consistent, with a mean higher heating value of 18.59 MJ kg^{-1} d.m. and low dispersion of both heating values. Lignocellulosic composition was dominated by cellulose (50.38% d.m.), followed by hemicellulose (19.52% d.m.) and lignin (10.23% d.m.). Total extractives averaged 19.94% (hot water extracted 11.79% d.m., other

soluble substances 8.15% d.m.). Growing year and cultivar significantly affected all traits and cultivar × year interaction contributed substantially to the observed heterogeneity; flower harvest influenced only moisture and ash content. Overall, hemp stalk quality should be selected through cultivar choice combined with season-specific assessment to better target potential conversion routes in bioenergy and biorefinery systems.

Keywords: *Cannabis sativa*; industrial hemp; stalk; stem; cellulose content; ash content; heating value;

1. Introduction

Cannabis sativa L. is a species native to Central Asia (India and China) that can be cultivated between the 25th and 55th parallels, with its cultivation history dating back at least 6,000 years (Di Simone et al., 2024; Hua et al., 2024; Marrot et al., 2022). Although contemporary yields are significantly higher than in the past, due to technological advances (Hua et al., 2024), the taxonomic classification of this plant remains one of the most ambiguous areas of research, with various phases of nomenclature attempts (Aloo et al., 2024). It has evolved from Linnaeus' concept of a single species to Lamarck's division into *C. sativa* and *C. indica*, Janischevsky's proposal of *C. ruderalis*, to the consolidation into a single species (a 1976 study by Small and Cronquist). Currently, the single species *C. sativa* comprises subspecies (including industrial hemp *C. sativa* ssp. s*ativa*) and cultivars (Frusciante et al., 2025; Petit et al., 2025). The definition of industrial hemp is strictly regulated by law in the Farm Bill. It defines industrial hemp as plants with a THC concentration of 0.3% or lower (Bajwa et al., 2025), which ensures that these plants have no psychoactive effect (Kafle et al., 2025). This subspecies is characterized by a unique metabolic profile and high stress resistance (Roman and Grzegorzewska, 2024). Unfortunately, many years of cultivation bans (over seven decades) in most countries prevented hemp from experiencing a "Green Revolution", resulting in a knowledge gap about the plant (Visković et al., 2023). The current renaissance in cultivation is driven by new agrotechnical strategies and

54 growing demand for resistant and renewable materials to support global sustainable development
55 (Dudziec et al., 2024; Enarevba and Haapala, 2024).
56 The profitability of industrial hemp stems from its multiple applications, as it supplies both
57 agricultural products, such as flowers and seeds, and industrial feedstocks for the production of hemp
58 concrete (hempcrete) in a single cultivation cycle (Ansari et al., 2025; Budhathoki et al., 2024). This
59 plant, owing to its ability to generate zero waste (all parts of hemp can be further processed and used
60 as primary or secondary resources), aligns well with environmental protection strategies (Gitsopoulos
61 et al., 2024; Rehman et al., 2021; Spampinato et al., 2024). Its particular advantage is the ability to
62 accumulate heavy metals, allowing industrial hemp to be grown on marginal, degraded, or
63 contaminated land without competing with food production (Akkaya et al., 2025; Abreu et al., 2022).
64 The integration of phytoremediation with biomass energy utilization is recommended as a method for
65 transforming wasteland into productive land (Todde et al., 2022).
66 Thanks to its high cellulose content (accompanied by a relatively low lignin content), hemp is a
67 promising feedstock for bioethanol production, although it requires pre-treatment due to its resistance
68 to chemical agents (Das et al., 2020; Ji et al., 2021; Rehman et al., 2021; Zhao et al., 2020a). It is also
69 possible to integrate biodiesel and bioethanol production in biorefineries, and hemp may yield
70 biodiesel at levels exceeding those of other oil crops (Rehman et al., 2021; Viswanathan et al., 2021).
71 Constituents such as lignin can also be converted into biofuels and chemicals (Brar et al., 2024).
72 Moreover, hemp shows potential for biogas production (Matassa et al., 2020) and can be used to
73 produce biohydrogen (Ingrao et al., 2021; Rehman et al., 2021).
74 Rapid growth, high biomass production, and a promising energy-to-input ratio have led to hemp being
75 cultivated as an energy crop in recent decades, and it is now classified as such (Abreu et al., 2022;
76 Gitsopoulos et al., 2024; Pan et al., 2025). Hemp has the potential to produce higher yields than many
77 other energy crops. The total hemp biomass per hectare is similar to that of other energy crops,
78 including mainly the giant miscanthus (*Miscanthus* × *giganteus*), poplar (*Populus* spp.) and willow
79 (*Salix* spp.) (Kołodziej et al., 2023). Industrial hemp can also compete with energy crops as a
80 feedstock for the production of many bioenergy products (Petlickaitė et al., 2022). The properties of

81 solid hemp biofuels may be similar to those of willow wood biomass, and higher than those of
82 miscanthus straw, both grown in the same region (Marrot et al., 2022).
83 In practice, residual biomass from hemp cultivation is often regarded as waste (Altman et al., 2024).
84 For example, the pharmaceutical sector is focused on cannabinoids such as cannabidiol (CBD), due to
85 their therapeutic potential and anti-inflammatory properties (Frusciante et al., 2025; Wang et al.,
86 2024). The cultivation of hemp for the CBD industry (in most Western European countries and
87 Slovenia), which is extracted from the flowers and leaves, yields by-products (stems and other shoots)
88 that can account for up to 70% of the plant's dry weight (Marrot et al., 2022). A similar situation may
89 occur in the cultivation (Chaowana et al., 2024) of essential oils (Dudzic et al., 2025). The stems,
90 however, are a bioresource that can be used for energy purposes to reduce dependence on fossil fuels .
91 The shoots, traditionally regarded as waste, have significant potential for biorefineries (Spampinato et
92 al., 2024). Research shows that hemp straw has relatively high combustion heat and low ash content
93 (Kraszkiewicz et al., 2019). It is also suitable for the production of pellets and briquettes (Chaowana et
94 al., 2024; Roman and Grzegorzewska, 2024), and can be used in torrefaction, pyrolysis or gasification
95 processes (for the production of, e.g., bio-coal or bio-torrefied biomass) (Jolaoso et al., 2026; Marrot
96 et al., 2022; Vávrová et al., 2022). The possibilities for utilizing waste straw have been described for
97 the Henola cultivar (Frankowski and Sieracka, 2021).
98 The selection of biomaterials for energy applications requires knowledge of their exact composition
99 (Elouardi et al., 2023). Even in the simplest combustion process, emissions are determined by the
100 feedstock composition (direct impact) and the harvest timing (indirect impact) (Rheay et al., 2021).
101 Hemp is a highly variable species that exhibits a marked capacity to modify its characteristics in
102 response to environmental conditions, with interactions between genotypes and environments
103 potentially divergent (Benkirane et al., 2026; Campbell et al., 2019; Hillig, 2004). Furthermore, the
104 cultivation of specific industrial hemp cultivars is generally aimed at maximizing the production of
105 one or more plant parts (Matassa et al., 2020), which may also affect the variability of residual
106 biomass composition. Currently, few studies in the literature have assessed the impact of cultivar,
107 growing season/year, and/or cultivation strategy/direction on the chemical profile of hemp stalks,
108 stems, or straw. Thus, there are no references to the differentiation of their composition through the

interaction of these factors. In view of the above, the aim of the study was to determine the composition of stalks remaining from the cultivation of seven industrial hemp cultivars (*C. sativa* ssp. *sativa*) at a poor soil site. The samples were derived from an experiment conducted at a single location over three years in two cultivation variants, with year and flower harvest as additional independent qualitative variables. The interaction among these three factors, with respect to their impact on all the analyzed dependent quantitative variables (17 parameters from proximate analysis, ultimate analysis, heating values, lignocellulosic composite and extracts), constitutes the study's innovative aspect.

2. Materials and methods

2.1. Study object

Samples of stems from seven cultivars of industrial hemp (*C. sativa* ssp. *sativa*) (Table 1) were collected in 2023−2025 (growing seasons of 2023, 2024 and 2025) from a field experiment conducted by the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, located in north-eastern Poland (coordinates: 53.710115503930176, 20.434934578229374).

Table 1

The experiment was set up on poor soil (lessive soil formed from water-borne dust, loess formations and dust of unknown origin; the granulometric composition of the arable soil layer corresponded to light dusty clay sand, the transitional layer to clay sand, and the deeper layer to light clay; pH = 4.7; soil organic carbon – 0.81%; content of assimilable forms P_2O_5 − 0.022%, K_2O − 0.015%, Mg − 0.004%). Under the Polish soil classification system for arable land (classes I–VI, where the best soils are assigned class I, and soils of classes III and IV are further divided into subclasses "a" and "b", where "a" indicates arable land of better quality), the site was designated with the symbol IVb. The soil parameters presented here are derived from the local official land registry and laboratory analyses (averaged over three years).

136 Each cultivar was grown in two variants: with and without flower harvesting during the flowering
137 period. The flowers were collected by manually cutting off the panicles of female plants at the tops of
138 the main shoots (approximately 15 cm was cut off). The experiment was, therefore, based on three
139 factors (factor 1: the cultivar – seven levels of the factor; factor 2: flower collection – two levels of the
140 factor; factor 3: the year – three levels of the factor), and was carried out in a randomized block design
141 with three replications. Therefore, the number of sample collections amounted to 126. Forty-two
142 different types of stalks were obtained.
143 The stalks were collected on the harvest day. The time of harvest, excluding unforeseen factors (e.g.,
144 labor and means of production, or weather), was determined each time by the phenological phase. The
145 harvest was carried out when, in at least two plots (each variant of the experiment was conducted in
146 three replicates), more than half of the plants had more than half of their ripe fruits in the middle part
147 of the panicles. Under the BBCH codification system, this corresponds to code 85 (Mishchenko et al.,
148 2017), and according to the codification of Mediavilla et al. (1998), to stages 2204 (dioecious
149 cultivars) and 2306 (monoecious cultivars). The plants were harvested using a brush cutter fitted with
150 a cutting blade. The upper parts of the shoots, on which the panicles were found, were then cut off.
151 The upper parts of the shoots with panicles were threshed in a threshing unit in a plot combine
152 harvester (a scope of another study), while the lower parts (consisting mainly of stalks with no side
153 shoots) were used as samples for testing. Three stalks were randomly sampled from seed-bearing
154 plants in each plot, and placed in plastic bags (monoecious plants in monoecious cultivars, and female
155 plants in dioecious cultivars).
156
157 *2.2. Laboratory analyses*
158 Immediately after the samples were delivered to the laboratory, the moisture (M) was determined. The
159 determination was carried out using the reference method, drying in a BINDER FD laboratory dryer at
160 105 °C until constant weight. M was determined from the sample's weight loss, in accordance with
161 PN-EN ISO 18134–1:2015 (the "oven dry" method for determining total moisture content).
162 Dried samples were ground in an analytical mill (Retsch SM 200) with a 1 mm sieve mesh size and
163 stored in plastic bags. Proximate analysis parameters, i.e., ash content (A), volatile matter content

(VM) and fixed carbon content (FC), were determined in an Eltra Tga-Thermostep thermogravimetric oven. The A content was determined as the weight of mineral residue after roasting the sample in the air at 550 °C under strictly controlled conditions, in accordance with PN-EN ISO 18122:2016-01. The VM was determined as a loss in weight (minus the moisture content of the analytical sample), resulting from heating a sample under the conditions specified in PN-EN ISO 18123:2016-01, corresponding to the fraction released during controlled, partial pyrolysis. The FC was calculated indirectly, using the balance approach with the formula: FC = 100% − (A + VM).

The elemental composition was determined as follows: the carbon content (C), hydrogen content (H) and sulfur content (S) by the instrumental method described in PN-EN ISO 16948: 2015-07, i.e. as the content of elements in solid biofuels, based on analysis following the complete combustion/oxidation of the sample in an elemental analyzer (Eltra GmbH CHS-500). The nitrogen content (N) was determined by the Kjeldahl method (K-435 mineralizer and BUCHI B-324 distiller), and the chlorine content (Cl) was determined through potentiometric titration with silver nitrate (V) (a kit equipped with a chloride ion-selective electrode and a reference electrode; PN-EN ISO 16994:2016-10).

The higher heating value (HHV) was determined in an IKA C2000 combustion bomb calorimeter using a dynamic method at a constant volume and a reference temperature of 25 °C, in accordance with PN-EN ISO 18125:2017-07. This standard describes the determination of HHV in an oxygen calorimeter and provides relationships for converting lower heating value (LHV). The LHV was calculated for the air-dry state (M = 15%) using the HHV and H.

The cold water extract (CWE) content was determined using an extraction method with F57 filter bags (ANKOM Technology): the samples were extracted with distilled water (20-25 °C) for 48 hours, then rinsed twice in an ANKOM A200 apparatus, dried, and weighed. The CWE proportion was calculated from the difference in weight before and after the extraction. The hot water extract (HWE) content was similarly determined by extracting for three hours at 100 °C. Detergent fiber fractions were also determined using ANKOM A200. The NDF content was determined in accordance with PN-EN ISO 16472:2007, i.e., as a fraction insoluble in a neutral detergent solution, determined gravimetrically. The ADF and ADL contents were determined in accordance with PN-EN ISO 13906:2009, which describes the gravimetric determination of the fiber fraction insoluble in an acid detergent (ADF) as

192 well as detergent lignin. Based on the differences in weight, the lignin (Lig), cellulose (Cel) and
193 hemicellulose (Hem) contents were calculated. Using the HWE and NDF results, the proportion of
194 other soluble substances (OSS) in a sodium lauryl sulphate-ethylenediaminetetraacetic acid system
195 was calculated.
196
197 *2.3. Statistical analysis*
198 For the characteristics examined, descriptive statistics (mean, median, minimum, maximum, lower
199 quartile, upper quartile, standard deviation, and coefficient of variation) were calculated. The
200 normality of the characteristics was verified using the Shapiro-Wilk test, and a three-factor ANOVA
201 analysis was then conducted. The main factors included the cultivar, year, and the flower harvest.
202 Arithmetic means and standard deviations were calculated for all parameters (for each level of the
203 three main factors). To simultaneously visualize selected average values across cultivars, 3D scatter
204 plots were created. Homogeneous groups were then identified using Tukey's (HSD) multiple-
205 comparison test at a significance level of $p<0.05$. Using standardized data for selected sets of
206 characteristics, parallel coordinate charts were created, with each polyline representing the profile of a
207 single cultivar. To assess the proportion of the variability of a particular characteristic explained by
208 individual main factors and their correlations, the percentages of the total sum of squares (SS)
209 attributable to each factor and their correlations were calculated. The Pearson correlation coefficient
210 between the parameters under analysis was then determined ($p<0.05$). As part of an agglomerative
211 hierarchical clustering analysis, the input data (characteristics) were standardized in columns. Ward's
212 method was used for agglomeration, and Euclidean distance served as the measure of distance.
213 Clusters were then determined using Sneath's criterion, with thresholds at one-third and two-thirds of
214 the maximum measure of distance D. As a result of the cluster analysis, a dendrogram was constructed
215 to illustrate the similarities among the stalks of the seven cultivars. To reduce dimensionality and
216 identify the main sources of variability, principal component analysis was performed on the
217 standardized data (variables calculated indirectly or representing subsets of other variables were
218 excluded). The results were presented as variable correlation circles and case projections onto the
219 PC1–PC2 plane, which enabled the assessment of relationships among characteristics and of

similarities/differences between the objects studied. Circles were manually added to the plot of the obtained scores for the cultivar × year interaction to facilitate visual identification of sample-grouping trends.

3. Results and discussion

3.1. Effect of cultivar, year, and flower harvest

The analysis of variance showed that the cultivar was a factor significantly differentiating almost all the characteristics under study ($p<0.05$), except for the contents of carbon (C), hydrogen (H) and sulfur (S), which indicates a strong genotypic conditioning of most parameters (Table 2). The year, i.e., the growing season, had a significant impact on all characteristics, confirming the importance of weather conditions and, thus, the environmental variability "embedded" in the year for the composition of hemp stalks. In contrast, the flower harvest only had a significant impact on the moisture (M) and ash (A) contents. This implies that, within the study's range, the flower harvest was of secondary importance relative to cultivar and year of cultivation.

Table 2

3.1.1. Proximate analysis

Differences were noted between the cultivars in their proximate profiles, indicating the absence of a single dominant "pattern" for these properties (Fig. 1). At the same time, different trade-offs between the parameters in the volatile matter content (VM)–fixed carbon content (FC)–A system, were highlighted for each cultivar, which should be considered when selecting hemp stalks for potential process use. The Finola cultivar profile was intriguing, as it not only had the lowest VM content but also the highest FC and A contents.

Figure 1

247 The M content of hemp stalks differed significantly among cultivars. The highest values were noted
248 for the Finola (64.01%; group “a”) and the Kompolti (63.97%; “a”) (Table 3). In contrast, the Earlina
249 8fc was characterized by the lowest M content, approximately 8.7 percentage points (pp) lower than
250 that of group “a”. The cultivars Białobrzeskie, Henola, Santhica 27 and Santhica 70 formed
251 intermediate groups (“ab”–“b”). Therefore, the dioecious cultivars exhibited the highest M values,
252 whereas for the monoecious cultivars, the M values were lower. During the growing season, the
253 highest M content was observed in 2025 (65.82%; “a”), and the lowest in 2024 (56.33%; “c”). The
254 hemp stalks, from which no flowers were harvested during the growing period, showed significantly
255 lower M content (60.43% vs 62.34%).
256 The M content of hemp stalks for cultivars Fibror 79 and Futura 75 was, on average, 57.6% at seed
257 maturity (Müssig and Beaugrand, 2025). In the experiment described, only Earlina 8fc achieved a
258 result similar to that during the harvest period (55.31%), while the M values for the other cultivars
259 were higher (60.88%–64.01%). The M values were lower than those for hemp grown for long fiber,
260 which is harvested while the stems still have leaves in the upper third of their height, typically at
261 75%−80% (Bruce et al., 2005). They were also lower than hemp harvested when the first mature seeds
262 appeared, with the average M value for nine cultivars ranging from 60.8% to 70.6% depending on the
263 year (Jankauskienė and Gruzdevienė, 2015).
264
265 **Table 3**
266
267 The highest VM value was observed for the Santhica 70 (77.23% d.m.; group “a”), whereas the lowest
268 value, approximately 3.4% lower, was observed for the Finola (“c”) (Table 3). In 2024, the VM
269 content was significantly higher (77.34%). In contrast, the FC content was highest in Santhica 27 and
270 Finola (21.47% and 21.45% d.m., respectively; “a”), and lowest by approximately 7.4% in Santhica 70
271 (“b”). The FC content was highest in 2025 (20.82% d.m.) and lowest in 2024 (a difference of 0.93 pp).
272 For hemp straw, Chen et al. (2022) reported an even higher VM content, accompanied by a lower FC
273 content: VM = 81.12% and FC = 16.21% d.m. On the contrary, even lower VM and higher FC values

were recorded for the Futura 75 cultivar stalks (VM = 72.1%, FC = 25.2% d.m.) (Marrot et al., 2022). In both cases, the developmental stage at which the hemp samples were taken was not specified. The A content showed strong varietal differentiation. The highest content was observed for Henola and Finola (4.14% and 3.92% d.m.; group "a"), i.e. for the morphologically lowest cultivars, and thus those with short stalks, a significant length of which is covered by the panicle (they can be described as flower-and-seed cultivars), and with the shortest development cycle/growing period (an average of 107 days for the Finola, and 125 days for the Henola). Group "b" with the significantly lowest A content, was formed by the most closely related cultivars (Table 1), i.e., the Santhica 27 and Santhica 70, which was approximately 26%-31% less than that for group "a". These are tall cultivars, with long stalks; their panicles do not cover their full length, and they have a longer growing season (cultivars often referred to as dedicated to biomass or fiber production). It is surprising that the lowest A value was noted for Kompolti stalks, as it was the tallest cultivar, and thus had the highest stalks and the longest growing season (157 days on average; often referred to as the biomass cultivar or the most "fiber-yielding" cultivar in the world). Flower harvest significantly increased the A content (3.55% vs 3.26% d.m.). In general, during the flowering period, the growth rate of the stem decreases, while the translocation of constituents to the panicle increases (Heard et al., 2017; Saloner and Bernstein, 2023). Flower harvest deprived the plants of the target recipient of minerals, although it could stimulate their uptake (the development of side shoots and, thus, panicles were observed in the upper part of the plants). It is probable that the flower harvest changed the "architecture" and allocation of minerals between organs, resulting in increased A levels in the stalks. Over the years of the study, the highest A content was observed in 2023 (4.19% d.m.), whereas the lowest (approximately 34%) was in 2024. A lower A content was noted for industrial hemp stalks from a certified organic dairy farm located in Italy (2.46% d.m., no cultivar specified) (Cardarelli et al., 2025). An almost identical A value to that of the Kompolti cultivar was found in the Eletta campana stalks (3.2% d.m.) (Branca et al., 2017). In turn, in a study by Dahal et al. (2023), the A content (3.56% d.m.) of hemp stalk (no cultivar specified) cultivated in Canada fell within the range for the studied cultivars.

3.1.2. Ultimate analysis and heating values

The cultivar significantly differentiated nitrogen (N) and chlorine (Cl) contents, with N differentiation being stronger (four homogeneous groups for N vs. two for Cl) (Table 4). At the same time, the year had a significant effect on all the elements under analysis, confirming that the conditions of the growing season had a greater impact on the elemental composition of hemp stalks than the genotype.

Table 4

The significantly highest N content was noted for the Finola (0.98% d.m.; group "a"), whereas the Santhica 27, Santhica 70 and Kompolti exhibited the lowest content of this element, which was 40%–43% lower (Table 4). Meanwhile, the Cl content was highest in Finola and in Santhica 70, which formed group "a" (0.161% and 0.152% d.m., respectively). The opposite group "b" (Białobrzeskie and Kompolti) contained 24%-28% less Cl. The fact that the Finola cultivar had the highest concentrations of N and Cl is not surprising. In the analyzed experiment, it had the shortest development cycle, averaging 107 days, and was therefore the shortest cultivar. The lowest concentrations of these two elements in the Kompolti cultivar are not surprising either (the cultivar with the longest development cycle of 157 days on average, and the tallest cultivar). In 2024, the highest C content (48.13% d.m.; the same group as that for 2023); H content (5.86% d.m.) and Cl content (0.183% d.m.) were noted, accompanied by the lowest S (0.018% d.m.) and N (0.48% d.m.) contents. The lowest C (46.72% d.m.), H (5.10% d.m.), and Cl (0.071% d.m.) contents were observed in 2025, concurrent with a maximum S content (0.053% d.m.).

A study by Jha et al. (2024) analyzed hemp straw (from local agricultural farms in Canada; no cultivar was specified) to obtain C/H/S/N compositions of 43.3%/6.3%/0.1%/0.7% d.m. Only the N content reported in this study was comparable to the average N content of the Earlina 8fc cultivar (Table 4). In turn, Frankowski and Sieracka (2021) analyzed Henola straw and obtained N and H values of 0.52% and 5.66% d.m., respectively. It was therefore similar in average N content to that of Santhica 27, Santhica 70, and Kompolti cultivars (Table 4). However, the H content for Henola straw was higher compared with average values for the individual cultivars. In contrast, another study (Väisänen et al., 2019) reported S content for the Futura 75 cultivar hemp stalk (0.0417% d.m.), which was similar to

330 the average for the Finola cultivar. Hemp hurds, i.e., one of the components of the stalk structure,
331 exhibited higher C and H contents (49.6% and 5.9% d.m., respectively) compared with average values
332 for the studied cultivars (Recio-Ruiz et al., 2025). They also showed a considerably lower N content
333 (0.2% d.m.) (Recio-Ruiz et al., 2025). There is currently a lack of comprehensive analyses of hemp
334 stalks in the literature, and bio-feedstocks such as hemp straw or hurd are not the same material as the
335 stalks.
336 Cultivar profiles in terms of elemental composition were influenced by N and Cl contents (Fig. 2).
337 Finola stood out most, with the highest N content, accompanied by high Cl content. The Kompolti was
338 at the opposite end of the spectrum, as it was the only cultivar with both low N and Cl contents. This
339 accurately reflects the reality "in the field", as Finola is generally the shortest cultivar with the shortest
340 development cycle, while Kompolti is the opposite, as it is the tallest cultivar with the longest
341 development cycle (among all cultivars in the experiment).
342
343 **Figure 2**
344
345 Higher heating value (HHV) and lower heating value (LHV) differed significantly between cultivars,
346 with Finola achieving the highest values (HHV = 18.80 MJ kg^{-1} d.m., LHV = 14.69 MJ kg^{-1}; group
347 "a") (Table 5 and Fig. 1). In contrast, Henola was characterized by the lowest values (with HHV and
348 LHV being approximately 2% lower than those for Finola). Santhica 27 and Santhica 70 belonged to
349 groups with relatively high energy values (group "ab"), while Białobrzeskie, Earlina 8fc and Kompolti
350 occupied intermediate positions (bc–cd), although the differences between the cultivars were not
351 significant (an LHV range of 14.32–14.69 MJ kg^{-1}). The year factor also had a significant impact on
352 the thermophysical properties. The years 2024 and 2025 were characterized by higher HHV values
353 (18.70 and 18.63 MJ kg^{-1} d.m.), as compared with 2023 (HHV lower by approximately 0.23–0.26 MJ
354 kg^{-1} d.m.). For LHV, there was a significant sequential increase from 2023 through 2024 to 2025
355 (14.38 vs 14.52 vs 14.60 MJ kg^{-1}), indicating that the growing season influenced the energy potential
356 of hemp stalks.
357

358 **Table 5**

359

360 Henola stalks were characterized by an HHV value similar to that for the whole plant of the Felina 32
361 cultivar (18.37 MJ kg^{-1}) (Zvicevičius et al., 2024). The HHV of cultivars (Table 5) was similar to the
362 average HHV of hemp stems (18.5 MJ kg^{-1}, an average for Beniko, Białobrzeskie, Epsilon, Fedora,
363 Felina 32, Futura 75, Santhica 27 and USO 31 cultivars) (Butkute et al., 2015). In contrast, the lowest
364 HHV value (17.50 MJ kg^{-1}) was noted for cannabis waste (no cultivar specified), mainly stalks and
365 stems, acquired from a cannabis plantation in Thailand (Kanchanatip et al., 2023).

366

367 *3.1.3. Lignocellulose composite and extracts*

368 The lowest average cellulose (Cel) content was noted for Finola and Earlina 8fc (44.35% and 46.24%
369 d.m., respectively; group "c"), whereas the highest content was noted for Białobrzeskie and Santhica
370 70 (approximately 7.1−9.2 pp higher; "a") (Table 6). Since these two cultivars, along with Santhica 27
371 and Kompolti, are taller cultivars that are dedicated to biomass and fiber production, the higher Cel
372 levels were in line with expectations. The growing season also had a significant impact on the Cel
373 content, with the highest average value in 2024 (53.19% d.m.) and the lowest in 2023 and 2025
374 (approximately 3.6 and 4.7 pp lower, respectively). The hemicellulose (Hem) content showed less
375 differentiation between the cultivars, but Finola and Earlina 8fc (21.46% and 20.52% d.m.,
376 respectively) belonged to group "a" with the highest values. The remaining cultivars were
377 concentrated in group "b" (approximately 0.5–2.3 pp lower). The highest lignin content (Lig) was
378 noted for Finola (11.76% d.m.; "a"), whereas the lowest content was noted for Kompolti ("d";
379 approximately 2.7 pp lower than that for "a"). Considering the year factor, biomass obtained in 2024
380 and 2025 had higher levels of Lig (10.68% and 10.41% d.m.; "a") than in 2023 (approximately
381 0.3−0.8 pp lower; "b"), suggesting a strong contribution of seasonal conditions to the lignification of
382 hemp stalks.

383

384 **Table 6**

385

In the literature, there is a lack of studies on the variation in hemp stalk composition by cultivar or by year/growing season. In Australia, the composition of hemp stems (cultivar unspecified) was defined, yielding a Cel/Hem/Lig ratio of 43%/14–15%/8% d.m. (Keiller et al., 2021). In turn, in Italy, an average of 62.6%/17.2%/9.8% d.m. was obtained for the Futura 75 cultivar hemp stems (Amaducci et al., 2000); only the Lig content corresponded to that of the Henola cultivar used in the present study. A different composition was observed in the fiber of hemp stalk, which is one of the two most common constituents next to hurd, (Cel/Hem/Lig equal to 72.1%/14.1%/8% d.m.) (Nair et al., 2015). For fiber collected exclusively from the middle part of the stem, the composition was 66.25%/11.88%/5.94% d.m., respectively for Cel/Hem/Lig (Liu et al., 2018). Liu et al. (2015) further differentiated the Lig content in fiber into early- and late-harvest (3.4% vs 4.8% d.m.). For hemp hurd, the following contents are provided: 50.3%/17.9%/17.2% d.m. (Laborel-Préneron et al., 2018). It is possible that the different fiber/hurd ratios in the stalks of different cultivars and/or the varied chemical composition of these two constituents of the stalks of each cultivar were responsible for the different ligno-hemicellulose profiles.

Cultivars did not follow a single common trend. Instead, they created distinct, characteristic lignocellulose profiles, which are important for the potential utilization of hemp stalks (Fig. 3). Finola was the most prominent, with a very high Hem content, the highest Lig content and a low Cel content. The second-most prominent cultivar was Earlina 8fc. The remaining cultivars exhibited a relatively high Cel content and lower Hem and Lig contents. This showed the trade-offs between the hemp stalk constituents.

Figure 3

The significantly highest cold water extract (CWE) content was noted for the Finola and Henola cultivars (10.67% and 10.56% d.m.; group “a”), whereas the lowest content of approximately 20%–26% was noted for the Santhica 70 and Białobrzeskie cultivars (“c”) (Table 6). A similar pattern was observed for the hot water extract (HWE) content, where Finola and Henola had the highest levels (13.09% and 13.36% d.m.; “a”), and Santhica 70, Białobrzeskie and Santhica 27 had the lowest

414 content (16%-26% lower than “a”). Other soluble substance (OSS) content reached the highest level in
415 Earlina 8fc (9.76% d.m.; “a”), whereas the lowest level was in Santhica 27 and Santhica 70
416 (27%–41% lower than “a”). The year factor strongly modified all extraction fractions. In 2023, the
417 highest CWE, HWE and OSS values were noted (all in “a”), whereas 2024 was characterized by the
418 lowest levels of these constituents (group “c” for CWE and OSS, “b” for HWE). This indicates the
419 impact of cultivation-year conditions on the pool of extractable compounds in hemp stalks.
420 The cultivars did not differ only in terms of the level of an individual fraction, but also in terms of the
421 mutual relationships between these fractions and extract profiles (Fig. 4). In general, Finola, Henola
422 and Earlina 8 fc surpassed the other cultivars (they were located in the area with the highest CWE,
423 HWE and OSS values). The remaining cultivars (Santhica 27, Santhica 70, Białobrzeskie, and
424 Kompolti) were concentrated in the lower range, indicating lower values of extractable compound
425 fractions. This spatial arrangement, although it paradoxically applies to hemp stalks, corresponds to
426 the characteristics of the cultivars under study. Finola, Henola, and Earlina 8fc are flower-and-seed
427 cultivars recommended for the production of flowers, essential oils, or seeds. On the other hand,
428 Santhica 27, Santhica 70, Białobrzeskie and Kompolti are cultivars recommended for fiber or biomass
429 production.
430
431 **Figure 4**
432
433 The total content of extracts from the analyzed cultivars ranged from 17.77% to 22.42% d.m. (Table
434 6). This partially coincides with the extract content determined for the Futura 75 cultivar stems, i.e.,
435 11%–19% d.m., depending on the harvest time (water-soluble extractives = 10%–17% d.m., and
436 ethanol-soluble extractives = 1%–2% d.m.) (Kreuger et al., 2011). However, for the Tygra cultivar, the
437 total extracted content was lower, i.e., 14.40% d.m. (Zhao et al., 2020b). Moreover, in another study,
438 extracts from field-retted stems of 11 cultivars ranged from 3.65%–11.92% d.m. (the study did not
439 report the significance of differences between cultivars) (Das et al., 2020). However, in this case, the
440 lower extract concentration can be explained by the field retting process, which lasted three to four
441 weeks.

442

443 *3.1.4. Cultivar profiles*

444 The hemp stalks under study formed distinct groups of similarity, confirming the existence of
445 differentiation by cultivars (Fig. 5). At a lower cut-off level (approximately 30% D/Dmax), two close
446 pairs were revealed, i.e., Białobrzeskie–Kompolti and Santhica 27–Santhica 70, indicating very similar
447 profiles of characteristics between them. At a higher level of agglomeration (approximately 40%
448 D/Dmax), another pair was formed by the Henola and Earlina 8fc cultivars, whereas Finola remained
449 separated, connecting with Henola and Earlina 8fc only at a high distance level (approximately 60%
450 D/Dmax). Finola cultivar hemp stalks were, therefore, the most different from the stalks of the
451 remaining cultivars. In general, at a D/Dmax of 66.6%, two clusters were observed. The first, four-
452 element cluster (more homogenous) was formed by the Białobrzeskie, Kompolti, Santhica 27 and
453 Santhica 70 cultivars. The second, three-element cluster (less homogenous) included Henola, Earlina
454 8fc and Finola. The first cluster consisted of taller cultivars with longer development cycles, dedicated
455 to biomass or fiber production. The second cluster comprised shorter cultivars with shorter
456 development cycles, dedicated to the production of seeds, flowers, or essential oils (referred to as
457 flower-and-seed cultivars). This is intriguing because only the chemical composition of hemp stalks
458 were analyzed, and it "reflected" the differences between the cultivar groups.

459

460 **Figure 5**

461

462 Among all the pairs analyzed, the Białobrzeskie and Kompolti stalks were the most similar to each
463 other (no other pair showed such a small agglomeration distance). This is, in a way, predictable, as
464 Kompolti was one of the parental forms used to breed the Białobrzeskie cultivar.
465 Finola stood out most among the other cultivars, e.g., due to the simultaneously highest N, Cl, Hem,
466 Lig, HWE, OSS, and HHV contents (Fig. 6). Compared with Finola, the Henola and Earlina 8fc
467 cultivars showed lower HHV or M values. This three-object cluster differed most markedly from the
468 second, four-object cluster (Kompolti, Białobrzeskie, Santhica 27, and Santhica 70) due to, inter alia,
469 lower VM and Cel contents, accompanied by higher A, N, Cl, Hem, HWE, and OSS contents.

Figure 6

3.2. Effect of interactions

The cultivar × year interaction was statistically significant for most characteristics under analysis, excluding the H, Cel, Hem and Lig contents, indicating that the effect of the cultivar on the characteristics of hemp stalks changed depending on the year (Table 7). The cultivar × flower harvest, flower harvest × year and the three-factor interactions were not significant for any of the characteristics.

Table 8

The interactions, except for cultivar × year, accounted for a marginal proportion of the variability in the characteristics under analysis (Fig. 7). The cultivar × year interaction largely accounted for the variability in the M, C, and Cl contents. In contrast, the single main factor of the year was the dominant source of variability for most hemp stalk characteristics, indicating a strong influence of the growing season. The cultivar factor also had a significant but secondary impact, most evident relative to the year for FC, HHV, LHV, Cel, Lig, and OSS.

Figure 7

The PCA chart for the cultivar × year combination revealed a clear grouping of scores, primarily by the year, followed by the cultivar (Fig. 8). Hemp stalks from 2023, 2024, and 2025 formed separate clusters within the PC1–PC2 space, which means that the variability between years was stronger than the differences between cultivars within the same year. For example, in 2025, hemp stalks (cultivar × year) shifted toward the Hem and S vectors on the PC1–PC2 plane, indicating relatively greater contributions from these two constituents compared with other years. At the same time, the dispersion

497 of points within individual years indicated that cultivars retained distinct characteristic profiles that
498 varied from year to year.
499
500 **Figure 8**
501
502 *3.3. General characteristics of hemp stalks*
503 *3.3.1. Proximate analysis*
504 For moisture content, the range of variability was wide (35.75%–69.70%). However, moderate
505 differentiation was confirmed by a standard deviation of 6.21% and a coefficient of variation of
506 10.12% (Table 8). Half of the observations fell between 58.85% (Q1) and 65.23% (Q3), indicating
507 relatively stable M levels in hemp stalks. The average value of 61.38% was higher than the typical
508 value for willows (ispp.) (52.32%) grown as energy crops over one-year rotation cycles (Krzyżaniak et
509 al., 2015) or *Miscanthus* × *giganteus* (44.37%) (Stolarski et al., 2014).
510
511 **Table 8**
512
513 The volatile matter content was very stable, with an average of 76.11% dry matter (d.m.) and little
514 dispersion (SD = 1.77% d.m.; CV = 2.32%) (Table 8). In other words, the volatile fraction remained
515 stable, and the differences between the stalks were insignificant. FC was also quite even, with an
516 average of 20.49% d.m., and low variability (SD = 1.35% d.m.; CV = 6.59%). Because typical values
517 were concentrated around ~20% d.m. (18.21%–24.49% d.m.), the stems were similar to each other.
518 Overall, the average VM content of hemp stalks was lower compared with *M.* × *giganteus* (77.2%–
519 80.6% d.m.) (Newton et al., 2025) or short rotation coppice (SRC) willows (79.4% d.m.) (Stolarski et
520 al., 2020). However, the average FC was higher than that in *M.* × *giganteus* (16.4–17.1% d.m.)
521 (Newton et al., 2025) and in the aforementioned willows (18.8%–19.7% d.m.) (Stolarski et al., 2020).
522 The average ash content was equal to 3.41% d.m., but the variability was evident (SD = 0.96 d.m., CV
523 = 28.33%), with a wide range of values (1.51%–6.92% d.m.) (Table 8). The A was a characteristic that
524 strongly differentiated the stalks (some samples had a content almost twice the Q1–Q3 range). The

525 average A was considerably higher compared with short rotation woody crops (SRWC) from one-year
526 rotation cycles (average values depending on species 1.18%−1.83% d.m.), *M.* × *giganteus* (2.76%
527 d.m.) or rye straw (2.71% d.m.) (Kowalczyk-juśko et al., 2022; Stachowicz and Stolarski, 2023;
528 Stolarski et al., 2024a). In turn, the ash content was lower than that for rapeseed, oat, wheat, corn or
529 triticale straw (average values of 7.28; 5.66; 5.51; 4.26 and 3.80% d.m., respectively) (Stolarski et al.,
530 2024a).
531
532 *3.3.2. Ultimate analysis and heating value*
533 The C content showed moderate variability (CV = 4.98%), with values concentrated within a narrow
534 interquartile range (45.76%–49.15% d.m.), indicating stable levels in the stalks (Table 8). The H
535 exhibited a similar level (CV = 6.47%) and a narrow range of values, confirming the homogeneity of
536 this characteristic. On the other hand, the S was distinguished by the highest variability (CV =
537 68.03%) and a wide range (0.006%–0.109% d.m.), meaning that the S strongly differentiated the
538 stalks. The stalks had lower average values of C, H and S (Table 8) compared with SRWC shoots
539 (average values of 49.1%, 6.0% and 0.04% d.m., respectively, for C, H and S) (Fernández et al., 2020).
540 A similar relationship in terms of C and H contents was observed in *M.* × *giganteus* (average values of
541 52.28% and 6.18% d.m., respectively) immediately after harvesting (unstored), which also showed a
542 similar S content (an average of 0.036% d.m.) (Stolarski et al., 2024b). The average C was either
543 higher or similar, the average H was either lower or similar, while the average S was lower than that
544 for cereal and rapeseed straw (the ranges of average values covering different species were
545 44.34%−47.93%, 5.38%−5.85% and 0.04%−0.24% d.m., respectively for C, H and S) (Stolarski et al.,
546 2024a). The N showed high variability (CV = 39.29%), with maximum values more than twice the
547 median (Table 8). Therefore, some samples contained elevated N levels despite low absolute values
548 (0.023%–0.331% d.m.). The Cl content was the second-most variable characteristic in the stalks (CV =
549 50.51%). The average N and Cl (Table 8) fell within an average range demonstrated for cereal and
550 rapeseed straw (0.54%−1.10% and 0.05%−0.34% d.m., respectively, for N and Cl) (Stolarski et al.,
551 2024a). As for the SRWC, the average N levels in the stalks fell into a range indicated for this group
552 (average values of 0.43%–0.86% d.m., depending on the species), with the average Cl being higher

553 (an average of 0.01%–0.02% d.m.) (Fernández et al., 2020). Compared with *M.* × *giganteus*, hemp
554 stalks contained higher levels of N and Cl (0.41% and 0.048% d.m., respectively) (Stolarski et al.,
555 2024b).
556 HHV was characterized by very low variability (SD = 0.25 MJ kg^{-1} d.m., CV = 1.36%), and the
557 interquartile range was narrow (18.43–18.72 MJ kg^{-1} d.m.), which indicated high energy homogeneity
558 of the stalks (Table 8). Similarly, LHV was stable and showed little variation, confirming the
559 material's consistency in terms of useful calorific value. Average HHV for hemp stalks (18.59 MJ kg^{-1}
560 d.m.) was higher than that for *M.* × *giganteus* biomass (16.5 and 17.78 MJ kg^{-1} d.m (Voća et al., 2021;
561 Von Cossel et al., 2022) or annual willow stalks (17.50 MJ kg^{-1} d.m.) (Słupska et al., 2019). However,
562 it was lower compared with the SRWC from a four-year rotation (on average, 19.46–19.84 MJ kg^{-1}
563 d.m., depending on the species) (Stachowicz and Stolarski, 2023). HHV also fell within the range for
564 cereal and rapeseed straw (on average, 18.16–19.03 MJ kg^{-1} d.m., depending on the species) (Stolarski
565 et al., 2024a).
566
567 *3.3.3. Lignocellulose composite and extracts*
568 The Cel content was centered at 50.38% d.m., with half of the results falling between 47.66% and
569 54.25% d.m. (Table 8). Variability was low (CV = 9.00%), although extreme samples extended the
570 range to 38.63%–59.50% d.m. The Hem content averaged 19.52% d.m. (range, 18.11%–20.57% d.m.),
571 indicating moderate dispersion (CV = 10.27%). The minimum and maximum values were 15.85% and
572 25.16% d.m., respectively. The Lig content, on the other hand, averaged 10.23% d.m., with a typical
573 range of 8.92%–11.16% d.m. and moderate variability (CV = 16.02%). At the same time, the range
574 from 6.63% to 15.70% d.m. indicated the presence of more "distant" samples. The average Cel content
575 in hemp stalks (Table 2) was higher than that in cereal and rapeseed straw (29.2%–43.0% d.m.,
576 depending on the species), whereas the average Hem and Lig contents fell within the range for the
577 aforementioned group (12.0%–35.0% and 6.3%–21.0% d.m., respectively) (Álvarez et al., 2021;
578 Mirzaee et al., 2023; Parsin and Kaltschmitt, 2024; Passoth and Sandgren, 2019). Compared with *M.* ×
579 *giganteus*, the average Cel content was higher (36%–38% d.m.), the Hem content fell within the range
580 (18%–26% d.m.), and the Lig content was lower (13%–18% d.m.) (Klímek et al., 2018). Hemp stalks

581 also had a higher average Cel content in relation to willow biomass from a one-year rotation cycle
582 (40.21% d.m.), with the average Hem and Lig contents being lower (29.06% and 24.38% d.m.,
583 respectively) (Stolarski et al., 2011).
584 The CWE averaged 9.40% d.m., with typical values (Q1–Q3) ranging from 8.27% to 11.01% d.m.
585 (Table 8). High variability (CV = 23.48%) and a wide min–max range (4.35%–15.02% d.m.) indicated
586 clear differences between the stalk samples. The HWE achieved an average value of 11.79% d.m.,
587 with half of the observations ranging from 10.67% to 13.52% d.m. The dispersion was strong,
588 comparable to that of the CWE (CV = 20.68%), and the extreme values (6.14%–18.39% d.m.)
589 indicated variable susceptibility of the material to hot-water extraction. In contrast, the OSS showed an
590 average of 8.15% d.m. with a relatively narrow range of 7.03%–9.00% d.m. Nevertheless, values
591 ranging from 4.58% to 16.39% d.m. and a CV of 19.67% indicated that the OSS also potentially
592 significantly differentiated the stalks. The total average extract content was 19.94% d.m., which was
593 higher than that for one-year-old willow stalks (average values of 10.95% and 16.45% d.m., depending
594 on the species); *M.* × *giganteus* (11.52% d.m.), sunflower (17.65% d.m.), rice (16.1%−19.3% d.m.),
595 wheat (8.0% and 8.6% d.m.) or rapeseed (10.56% d.m.) straw (Ghaffar, 2019; Pisanó et al., 2021;
596 Satlewal et al., 2018; Stolarski et al., 2024b; Stolarski et al., 2020a).
597 The strongest correlations were observed between CWE and HWE (r = 0.99) and between Cl and
598 HHV (r = 0.96) (Fig. 9). VM and FC were clearly negatively correlated (r = −0.84). The A value was
599 positively correlated with the N value (r = 0.74) and the extract fractions of CWE/HWE/OSS (r =
600 0.67/0.68/0.65). In turn, the Cel content was negatively correlated with these extracts (r = -0.69/-0.71/-
601 0.58). The M value showed negative correlations with H and LHV (r = –0.54) and positive correlations
602 with FC, Hem, and CWE/HWE (r = 0.31–0.34).
603
604 **Figure 9**
605
606 **4. Conclusions**
607 This study demonstrated that the physicochemical and energy-related properties of hemp stalks were
608 primarily governed by growing year, with cultivar effects expressed as consistent but secondary

609 sources of variability. Proximate composition, lignocellulosic fractions and extractives revealed clear
610 cultivar-specific profiles, whereas ultimate analysis showed limited genotypic differentiation in C, H
611 and S; only N and Cl were significant and determined the ultimate composition profile.
612 Multivariate analyses confirmed that hemp stalks clustered mainly according to year, with cultivar-
613 related variation occurring within seasonal groupings, highlighting the importance of cultivar × year
614 interactions in biomass quality assessment. Overall, the results indicate that industrial hemp stalks
615 constitute a heterogeneous raw material whose quality can be optimized through informed cultivar
616 selection combined with consideration of growing season-dependent environmental effects. Exploiting
617 knowledge of these relationships may further enhance the potential of hemp stalks for applications in
618 bioenergy and biorefinery systems.
619 Finola stalks differed the most from the other cultivars, among others due to simultaneously and
620 significantly the highest N, Cl, Hem, Lig, HWE, OSS and HHV. Henola and Earlina 8fc had, in
621 comparison with Finola, lower HHV or M. This three-object group differed from the second, four-
622 object group (Kompolti, Białobrzeskie, Santhica 27 and Santhica 70), among others due to lower VM
623 and Cel with simultaneously higher A, N, Cl, Hem, HWE or OSS. This four-object cluster was formed
624 by taller cultivars with a longer developmental cycle and dedicated to biomass or fibre production. In
625 contrast, the three-object group comprised shorter cultivars with a shorter developmental cycle and
626 dedicated to seed, flower or essential oil production (they may be described as seed–flower types).
627 In future studies, attention should be focused on a separate analysis of the main structural components
628 of hemp stalks—fibres and hurds/shives—obtained via mechanical decortication, water retting and/or
629 field retting. The variability observed in whole stalks (as modified by cultivar or year) may originate
630 from changes in one of these fractions or from their combined contribution. Such an approach would
631 also be more consistent with circular economy principles and cascading biomass utilisation, as stalk
632 fibres harvested at seed maturity may still retain practical value for the textile industry. An additional
633 aspect concerns dioecious cultivars, for which fully male and fully female plants should be compared;
634 in the present study hemp stalks were derived exclusively from seed-bearing plants.
635

636 **Acknowledgements**

This research results from a study carried out at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, topic number 30.610.007-110. The project was supported by the Minister of Science under the “Regional Initiative of Excellence Program”, RID/SP/0025/2024/01. The author would also like to thank the staff of the Department of Genetics Plant Breeding and Bioresource Engineering for their technical support during the experiment.

CRediT authorship contribution statement

Paweł Dudziec: Conceptualization; Methodology; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data curation; Writing - original draft; Writing - review & editing; Visualization; Supervision; Project administration; **Mariusz Jerzy Stolarski**: Validation; Formal analysis; Writing - review & editing; Supervision; Project administration; Funding acquisition.

References

Abreu, M., Silva, L., Ribeiro, B., Ferreira, A., Alves, L., Paixão, S.M., Gouveia, L., Moura, P., Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Fernando, A.L., Reis, A., Gírio, F., 2022. Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. Energies (Basel). https://doi.org/10.3390/en15124348

Akkaya, G.K., Erdal, İ., Tosun, İ., 2025. Phytoremediation potential of industrial hemp grown in sewage sludge: Growth performance and environmental impact. J. Environ. Chem. Eng. 13, 117173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117173

Aloo, S.O., Mwiti, G., Ngugi, L.W., Oh, D.H., 2024. Uncovering the secrets of industrial hemp in food and nutrition: The trends, challenges, and new-age perspectives. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2149468

Altman, A.W., Kent-Dennis, C., Klotz, J.L., McLeod, K.R., Vanzant, E.S., Harmon, D.L., 2024. Review: Utilizing industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) by-products in livestock rations. Anim. Feed Sci. Technol. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115850

Álvarez, C., González, A., Ballesteros, I., Negro, M.J., 2021. Production of xylooligosaccharides, bioethanol, and lignin from structural components of barley

669 straw pretreated with a steam explosion. Bioresour. Technol. 342.
670 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125953

671 Amaducci, S., Amaducci, M.T., Benati, R., Venturi, G., 2000. Crop yield and quality
672 parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the
673 North of Italy, Industrial Crops and Products.

674 Ansari, O., De Prato, L., Slaski, J., 2025. A photoperiod-based classification of industrial
675 hemp (*Cannabis sativa* L.) and its agronomic implications. Ind. Crops Prod. 233.
676 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121431

677 Bajwa, P., Singh, S., Kafle, A., Saini, R., Trostle, C., 2025. Effect of planting dates and
678 seeding densities on growth, physiology, and yield of industrial hemp. Crop Sci. 65.
679 https://doi.org/10.1002/csc2.70017

680 Benkirane, C., Mansouri, F., Rhazi, L., Gotor, A.A., Serghini-Caid, H., Elamrani, A.,
681 Abid, M., 2026. Unraveling the genetic diversity of *Cannabis sativa* L.: Phenotypic
682 and molecular assessment, drivers of variation, and implications. Ind. Crops Prod.
683 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122575

684 Branca, C., Di Blasi, C., Galgano, A., 2017. Experimental analysis about the exploitation
685 of industrial hemp (*Cannabis sativa*) in pyrolysis. Fuel Processing Technology 162,
686 20–29. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.028

687 Brar, K.K., Raheja, Y., Chadha, B.S., Magdouli, S., Brar, S.K., Yang, Y.H., Bhatia, S.K.,
688 Koubaa, A., 2024. A paradigm shift towards production of sustainable bioenergy
689 and advanced products from *Cannabis*/hemp biomass in Canada. Biomass Convers.
690 Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02570-6

691 Bruce, D.M., Hobson, R.N., Hamer, P.J.C., White, R.P., 2005. Drying of hemp for long
692 fibre production. Biosyst. Eng. 91, 45–59.
693 https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.002

694 Budhathoki, R., Maraseni, T., Apan, A., 2024. Enviro-economic and feasibility analysis
695 of industrial hemp value chain: A systematic literature review. GCB Bioenergy.
696 https://doi.org/10.1111/gcbb.13141

697 Butkutė, B., Liaudanskienė, I., Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., Cesevičienė, J.,
698 Amalevičiūtė K., Features of Carbon Stock in Biomass of Indsutrial Hemp and
699 Stinging Nettle, in: Sayigh, A. (Ed.), Renewable Energy in the Service of Mankind
700 Vol I, Selected Topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014,
701 Springer, Brighton, 2015, pp. 17−30.

702 Campbell, B.J., Berrada, A.F., Hudalla, C., Amaducci, S., McKay, J.K., 2019. Genotype
703 × Environment Interactions of Industrial Hemp Cultivars Highlight Diverse
704 Responses to Environmental Factors. Agrosystems, Geosciences and Environment
705 2, 1–11. https://doi.org/10.2134/age2018.11.0057

706 Cardarelli, A., Cucina, M., Agresti, G., Nicolini, A., Cavalaglio, G., Barbanera, M., 2025.
707 Optimizing co-hydrothermal carbonization of organic dairy manure and hemp
708 stalks: a multi-criteria decision-making approach. Energy Nexus 20.
709 https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100533

Chaowana, P., Hnoocham, W., Chaiprapat, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Chaisan, T., Paopun, Y., Pisutpiched, S., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., 2024. Utilization of hemp stalk as a potential resource for bioenergy. Mater. Sci. Energy Technol. 7, 19–28. https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.07.001

Chen, X., Wu, R., Sun, Y., Jian, X., 2022. Synergistic Effects on the Co-pyrolysis of Agricultural Wastes and Sewage Sludge at Various Ratios. ACS Omega 7, 1264–1272. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05884

Dahal, R.K., Acharya, B., Dutta, A., 2023. Thermal Response of Biocarbon-Filled Hemp Fiber-Reinforced Bioepoxy Composites. ACS Omega 8, 15422–15440. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00700

Das, L., Li, W., Dodge, L.A., Stevens, J.C., Williams, D.W., Hu, H., Li, C., Ray, A.E., Shi, J., 2020. Comparative Evaluation of Industrial Hemp Cultivars: Agronomical Practices, Feedstock Characterization, and Potential for Biofuels and Bioproducts. ACS Sustain. Chem. Eng. 8, 6200–6210. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06145

Di Simone, S.C., Libero, M.L., Pulcini, R., Nilofar, N., Chiavaroli, A., Tunali, F., Angelini, P., Flores, G.A., Venanzoni, R., Cusumano, G., Zengin, G., Brunetti, L., Recinella, L., Leone, S., Orlando, G., Menghini, L., Ferrante, C., Acquaviva, A., 2024. Phytochemical profiling and biological evaluation of the residues from industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) inflorescences trimming: Focus on water extract. Food Biosci. 62. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105344

Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2025. Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity. Ind. Crops Prod. 235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800

Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2024. Industrial Hemp As a Multi-Purpose Crop: Last Achievements and Research in 2018−2023. Journal of Natural Fibers. https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2369186

Elouardi, M., Fattah, G., Benchrifa, M., Mabrouki, J., Zair, T., Belghiti, M.A. El, 2023. The Evaluation of the Valorization of Cannabis Residues for the Production of Energy by Combustion, in: Mabrouki, J., Mourade, A., Irshad , A., Chaudhry, S.A. (Eds.), Advanced Technology for Smart Environment and Energy. Springer International Publishing, Cham, pp. 247–256. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25662-2_20

Enarevba, D.R., Haapala, K.R., 2024. The Emerging Hemp Industry: A Review of Industrial Hemp Materials and Product Manufacturing. AgriEngineering. https://doi.org/10.3390/agriengineering6030167

Fernández, M.J., Barro, R., Pérez, J., Ciria, P., 2020. Production and composition of biomass from short rotation coppice in marginal land: A 9-year study. Biomass Bioenergy 134. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105478

749 Frankowski, J., Sieracka, D., 2021. Possibilities for Using Waste Hemp Straw for Solid
750 Biofuel Production. MDPI AG, p. 18.
751 https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009018

752 Frusciante, L., Geminiani, M., Shabab, B., Olmastroni, T., Roncucci, N., Mastroeni, P.,
753 Salvini, L., Lamponi, S., Trezza, A., Santucci, A., 2025. Enhancing Industrial Hemp
754 (*Cannabis sativa*) Leaf By-Products: Bioactive Compounds, Anti-Inflammatory
755 Properties, and Potential Health Applications. Int. J. Mol. Sci. 26.
756 https://doi.org/10.3390/ijms26020548

757 Ghaffar, S.H., 2019. Wheat straw biorefinery for agricultural waste valorisation. Green
758 Mater. 8, 60–67. https://doi.org/10.1680/jgrma.19.00048

759 Gitsopoulos, T., Tsaliki, E., Korres, N.E., Georgoulas, I., Panoras, I., Botsoglou, D.,
760 Vazanelli, E., Fifis, K., Zisis, K., 2024. Response of Industrial Hemp (*Cannabis*
761 *sativa* L.) to Herbicides and Weed Control. International Journal of Plant Biology
762 15, 281–292. https://doi.org/10.3390/ijpb15020024

763 Heard, J., Watson, K., Kostiuk, J., 2007. Nutrient Uptake and Partitioning by Industrial
764 Hemp Dry matter (DM) accumulation Influence of retting on nutrient removal
765 Acknowledgements, The ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings
766 (November 4−8, 2007).

767 Hillig, K.W., 2004. A chemotaxonomic analysis of terpenoid variation in Cannabis.
768 Biochem. Syst. Ecol. 32, 875–891. https://doi.org/10.1016/j.bse.2004.04.004

769 Hua, K.Q., Yi, S.Z., Sheng, Q.C., Fu, W.Y., Xuan, Z., Xia, S.X., Yan, C.X., Dan, Y.D.,
770 Dong, J.W., Mei, Y.H., Li, T.L., Dan, L.D., Bo, Y.Y., 2024. The Study Progress on
771 Breeding of Flax and Industrial Hemp in China. Journal of Natural Fibers.
772 https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2389159

773 Ingrao, C., Novelli, V., Valenti, F., Messineo, A., Arcidiacono, C., Huisingh, D., 2021.
774 Feasibility of usage of hemp as a feedstock for anaerobic digestion: Findings from a
775 literature review of the relevant technological and energy dimensions. Crit. Rev.
776 Environ. Sci. Technol. 51, 1129–1158.
777 https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1745036

778 Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., 2015. Screening of Industrial Hemp (*Cannabis sativa*
779 L.) Cultivars for Biomass Yielding Capacities in Lithuania. Journal of Natural
780 Fibers 12, 368–377. https://doi.org/10.1080/15440478.2014.929556

781 Jha, S., Pattnaik, F., Nanda, S., Zapata, O., Acharya, B., Dalai, A.K., 2024. Investigations
782 of thermal effects during pyrolysis of agro-forestry biomass and physicochemical
783 characterizations of biofuel products. Biocatal. Agric. Biotechnol. 61.
784 https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103379

785 Ji, A., Jia, L., Kumar, D., Yoo, C.G., 2021. Recent advancements in biological
786 conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products. Fermentation.
787 https://doi.org/10.3390/fermentation7010006

Jolaoso, L.A., Stagg-Williams, S.M., Okolie, J.A., 2026. Thermochemical valorization of industrial hemp residues: Advances in hydrothermal conversion for biofuels and chemicals. Biomass Bioenergy. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108349

Kafle, S., Poudel, B., Gyawali, P., Bhattarai, D.R., Acharya, T.D., Acharya, R., Dhakal, S., Pradhan, P., Adhikari, S., 2025. Industrial hemp in Nepal: Production and valorization perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews 215, 115622. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115622

Kanchanatip, E., Prasertsung, N., Thasnas, N., Grisdanurak, N., Wantala, K., 2023. Valorization of cannabis waste via hydrothermal carbonization: solid fuel production and characterization. Environmental Science and Pollution Research 30, 90318–90327. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24123-0

Keiller, B.G., Potter, M., Burton, R.A., van Eyk, P.J., 2021. Elucidating the degradation reaction pathways for the hydrothermal carbonisation of hemp via biochemical compositional analysis. Fuel 294. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120450

Klímek, P., Wimmer, R., Meinlschmidt, P., Kúdela, J., 2018. Utilizing Miscanthus stalks as raw material for particleboards. Ind. Crops Prod. 111, 270–276. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.032

Kołodziej, J., Pudełko, K., Mańkowski, J., 2023. Energy and Biomass Yield of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) as Influenced by Seeding Rate and Harvest Time in Polish Agro-Climatic Conditions. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159609

Kowalczyk-juśko, A., Mazur, A., Pochwatka, P., Janczak, D., Dach, J., 2022. Evaluation of the Effects of Using the Giant Miscanthus (Miscanthus × Giganteus) Biomass in Various Energy Conversion Processes. Energies (Basel). 15. https://doi.org/10.3390/en15103486

Kraszkiewicz, A., Kachel, M., Parafiniuk, S., Zajac, G., Niedziółka, I., Sprawka, M., 2019. Assessment of the possibility of using hemp biomass (*Cannabis sativa* L.) for energy purposes: A case study. Applied Sciences (Switzerland) 9. https://doi.org/10.3390/app9204437

Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S.E., Englund, J.E., Björnsson, L., 2011. Anaerobic digestion of industrial hemp-Effect of harvest time on methane energy yield per hectare. Biomass Bioenergy 35, 893–900. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005

Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., 2015. Thermophysical and chemical properties of biomass obtained from willow coppice cultivated in one- and three-year rotation cycles. J. Elem. 20, 161–175. https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.4.695

Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.E., 2018. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. Waste Biomass Valorization 9, 1095–1112. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z

Liu, J., Guan, Z., Li, Z., 2018. Application of cryogenic and mechanical treatment in degumming of hemp stems. Biosyst. Eng. 174, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.007

Liu, M., Fernando, D., Daniel, G., Madsen, B., Meyer, A.S., Ale, M.T., Thygesen, A., 2015. Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. Ind. Crops Prod. 69, 29–39. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.010

Marrot, L., Candelier, K., Valette, J., Lanvin, C., Horvat, B., Legan, L., DeVallance, D.B., 2022. Valorization of Hemp Stalk Waste Through Thermochemical Conversion for Energy and Electrical Applications. Waste Biomass Valorization 13, 2267–2285. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01640-6

Matassa, S., Esposito, G., Pirozzi, F., Papirio, S., 2020. Exploring the biomethane potential of different industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) biomass residues. Energies (Basel). 13. https://doi.org/10.3390/en13133361

Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., Soldati, A., 1998. Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.), SOURCE: JOURNAL OF THE INTERNATIONAL HEMP ASSOCIATION.

Mirzaee, N., Nikzad, M., Battisti, R., Araghi, A., 2023. Isolation of cellulose nanofibers from rapeseed straw via chlorine-free purification method and its application as reinforcing agent in carboxymethyl cellulose-based films. Int. J. Biol. Macromol. 251, 126405. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126405

Mishchenko, S., Mokher, J., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., Dudukova, S., 2017. Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): codification and description according to the BBCH scale. Agronomy 24, 31−36.

Müssig, J., Beaugrand, J., 2025. Decortication and separation of wet or dry hemp stems - What difference does it make? Ind. Crops Prod. 223. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119965

Nair, G.R., Lyew, D., Yaylayan, V., Raghavan, V., 2015. Application of microwave energy in degumming of hemp stems for the processing of fibres. Biosyst. Eng. 131, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.012

Newton, R.A., Pidlisnyuk, V., Pohl, R., Mamirova, A., Zschunke, T., 2025. Impact of cultivation conditions on physicochemical characteristics of Miscanthus × giganteus biomass. International Journal of Environmental Science and Technology 22, 8605–8618. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05604-w

Pan, J., Xu, G., Liang, M., Mo, H., Luo, D., Wang, C., Ullah, R., Li, Y., Liao, C., Wei, X., Chen, P., 2025. Kenaf biochar enhances heavy metal phytostabilization and growth of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) using multi-metal contaminated mining site soils. Plant Physiology and Biochemistry 229. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110312

Parsin, S., Kaltschmitt, M., 2024. Processing of hemicellulose in wheat straw by steaming and ultrafiltration – A novel approach. Bioresour. Technol. 393. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130071

Passoth, V., Sandgren, M., 2019. Biofuel production from straw hydrolysates: current achievements and perspectives. Appl. Microbiol. Biotechnol. https://doi.org/10.1007/s00253-019-09863-3

Petit, J., Monfort A., Argyris, J., Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Breeding, in: Salem K.F.M., Al-Khayri J.M., Jain S.M. (Eds), Breeding and Biotechnology of Grass and Bast Fiber Crops, Advances in Plant Breeding Strategies 12, Springer, Cham, 2025, pp. 507−562.

Petlickaitė, R., Jasinskas, A., Mieldažys, R., Romaneckas, K., Praspaliauskas, M., Balandaitė, J., 2022. Investigation of Pressed Solid Biofuel Produced from Multi-Crop Biomass. Sustainability (Switzerland) 14. https://doi.org/10.3390/su14020799

Pisanó, I., Gottumukkala, L., Hayes, D.J., Leahy, J.J., 2021. Characterisation of Italian and Dutch forestry and agricultural residues for the applicability in the bio-based sector. Ind. Crops Prod. 171. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113857

Recio-Ruiz, M. del C., Ruiz-Rosas, R., García-Mateos, F.J., Valero-Romero, M.J., Rosas, J.M., Rodríguez-Mirasol, J., Cordero, T., 2025. An integrated approach to the valorization of pyrolysis products from lignocellulosic residues and by-products. Biomass Bioenergy 196. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107676

Rehman, M., Fahad, S., Du, G., Cheng, X., Yang, Y., Tang, K., Liu, L., Liu, F.-H., Deng, G., 2021. Evaluation of hemp (*Cannabis sativa* L.) as an industrial crop: a review. Environ Sci Pollut Res 28, 52832–52843. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16264-5

Rheay, H.T., Omondi, E.C., Brewer, C.E., 2021. Potential of hemp (*Cannabis sativa* L.) for paired phytoremediation and bioenergy production. GCB Bioenergy. https://doi.org/10.1111/gcbb.12782

Roman, K., Grzegorzewska, E., 2024. The Comparison of Physical and Chemical Properties of Pellets and Briquettes from Hemp (*Cannabis sativa* L.). Energies (Basel). 17. https://doi.org/10.3390/en17092210

Saloner, A., Bernstein, N., 2023. Dynamics of Mineral Uptake and Plant Function during Development of Drug-Type Medical Cannabis Plants. Agronomy 13. https://doi.org/10.3390/agronomy13122865

Satlewal, A., Agrawal, R., Bhagia, S., Das, P., Ragauskas, A.J., 2018. Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. https://doi.org/10.1002/bbb.1818

Słupska, M., Dyjakon, A., Stopa, R., 2019. Determination of strength properties of energy plants on the example of miscanthus-giganteus, rosa multiflora and salix viminalis. Energies (Basel). 12. https://doi.org/10.3390/en12193660

907 Spampinato, G., Candeliere, F., Amaretti, A., Paris, R., Montanari, M., Virzì, N., Strani,
908 L., Citti, C., Cannazza, G., Rossi, M., Raimondi, S., 2024. A three-years survey of
909 microbial contaminants in industrial hemp inflorescences from two Italian
910 cultivation sites. J. Cannabis Res. 6. https://doi.org/10.1186/s42238-024-00241-z

911 Stachowicz, P., Stolarski, M.J., 2023. Thermophysical Properties and Elemental
912 Composition of Black Locust, Poplar and Willow Biomass. Energies (Basel). 16.
913 https://doi.org/10.3390/en16010305

914 Stolarski, M.J., Dudziec, P., Krzyżaniak, M., Graban, Ł., Lajszner, W., Olba–Zięty, E.,
915 2024. How do key for the bioenergy industry properties of baled biomass change
916 over two years of storage? Renew. Energy 224.
917 https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120236

918 Stolarski, M.J., Krzyzaniak, M., Śnieg, M., Słomińska, E., Piórkowski, M., Filipkowski,
919 R., 2014. Thermophysical and chemical properties of perennial energy crops
920 depending on harvest period. Int. Agrophys. 28, 201–211.
921 https://doi.org/10.2478/intag-2014-0009

922 Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Wróblewska, H., Krzyżaniak, M.,
923 2011. Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock.
924 Ind. Crops Prod. 33, 217–223. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.013

925 Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., Tyśkiewicz, K., Olba-Zięty, E., Graban,
926 Ł., Lajszner, W., Załuski, D., Wiejak, R., Kamiński, P., Rój, E., 2020a. How does
927 extraction of biologically active substances with supercritical carbon dioxide affect
928 lignocellulosic biomass properties? Wood Sci. Technol. 54, 519–546.
929 https://doi.org/10.1007/s00226-020-01182-5

930 Stolarski, M.J., Welenc, M., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., Wierzbicki, S.,
931 2024. Characteristics and Changes in the Properties of Cereal and Rapeseed Straw
932 Used as Energy Feedstock. Energies (Basel). 17.
933 https://doi.org/10.3390/en17051243

934 Stolarski, M.J., Zaniak, M.K., Nski, K.W., Załuski, D., Olba-Ziety, E., 2020b. Willow
935 biomass as energy feedstock: The effect of habitat, genotype and harvest rotation on
936 thermophysical properties and elemental composition. Energies (Basel). 13.
937 https://doi.org/10.3390/en13164130

938 Todde, G., Carboni, G., Marras, S., Caria, M., Sirca, C., 2022. Industrial hemp (*Cannabis*
939 *sativa* L.) for phytoremediation: Energy and environmental life cycle assessment of
940 using contaminated biomass as an energy resource. Sustainable Energy
941 Technologies and Assessments 52. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102081

942 Väisänen, T., Kilpeläinen, P., Kitunen, V., Lappalainen, R., Tomppo, L., 2019. Effect of
943 steam treatment on the chemical composition of hemp (*Cannabis sativa* L.) and
944 identification of the extracted carbohydrates and other compounds. Ind. Crops Prod.
945 131, 224–233. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.055

946 Vávrová, K., Solcova, O., Knápek, J., Weger, J., Soukup, K., Humešová, T., Králík, T.,
947 Bím, J., 2022. Economic evaluation of Hemp's (*Cannabis sativa*) residual biomass

948 for production of direct energy or biochar. Fuel 329, 125435.
949 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125435

950 Visković, J., Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Noller, J., Latković, D., Ocamb, C.M., Koren,
951 A., 2023. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Agronomy and Utilization: A
952 Review. Agronomy. https://doi.org/10.3390/agronomy13030931

953 Viswanathan, M.B., Cheng, M.H., Clemente, T.E., Dweikat, I., Singh, V., 2021.
954 Economic perspective of ethanol and biodiesel coproduction from industrial hemp.
955 J. Clean. Prod. 299. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126875

956 Voća, N., Leto, J., Karažija, T., Bilandžija, N., Peter, A., Kutnjak, H., Šurić, J., Poljak,
957 M., 2021. Energy properties and biomass yield of miscanthus x giganteus fertilized
958 by municipal sewage sludge. Molecules 26.
959 https://doi.org/10.3390/molecules26144371

960 Von Cossel, M., Lebendig, F., Müller, M., Hieber, C., Iqbal, Y., Cohnen, J., Jablonowski,
961 N.D., 2022. Improving combustion quality of Miscanthus by adding biomass from
962 perennial flower-rich wild plant species. Renewable and Sustainable Energy
963 Reviews 168. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112814

964 Wang, T., Li, W., Wang, F., Li, J., Qin, J., Song, Z., Xu, J., Qiu, H., Cheng, Y., 2024.
965 Biocontrol potential of Bacillus velezensis SEC-024A against southern blight of
966 industrial hemp. Ind. Crops Prod. 222, 119767.
967 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119767

968 Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Roozeboom, K., Wang, D., 2020a. Bioconversion
969 of industrial hemp biomass for bioethanol production: A review. Fuel.
970 https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118725

971 Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Wang, D., 2020b. High Ethanol Concentration (77
972 g/L) of Industrial Hemp Biomass Achieved through Optimizing the Relationship
973 between Ethanol Yield/Concentration and Solid Loading. ACS Omega 5, 21913–
974 21921. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03135

975 Zvicevičius, E., Žiūra, K., Tilvikienė, V., Bakšinskaitė, A., 2024. Biomass Analysis of
976 Industrial Hemp "Felina 32" and the Influence of Plant Height on its Quality.
977 Bioresources. https://doi.org/10.15376/biores.19.3.6380-6402

978

8.4. Publikacja: Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity

Industrial Crops & Products 235 (2025) 121800

Contents lists available at ScienceDirect

Industrial Crops & Products

journal homepage: www.elsevier.com/locate/indcrop

Industrial hemp solid hydro-distillation residue-properties and diversity

Paweł Dudziec [a], Kazimierz Warmiński [b], Mariusz J. Stolarski [a,c,*]

[a] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, Plac Łódzki 3, Olsztyn 10–719, Poland
[b] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Chemistry, Plac Łódzki 4, Olsztyn 10-721, Poland
[c] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Centre for Bioeconomy and Renewable Energies, Plac Łódzki 3, Olsztyn 10–719, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:
Cannabis sativa
Industrial hemp
Hydro-distillation
Distillation residue
Essential oil
Solid hydro-distillation residue

ABSTRACT

This study aimed to characterize the chemical and energy-relevant profile of biomass residue from the solid hydro-distillation of industrial hemp. The goal was to support its effective management and assess its potential use. Interest in medicinal and aromatic plants (MAP), especially in essential oil production, is increasing, with industrial hemp receiving growing attention. Despite this, no comprehensive data exist on the chemical composition of solid residues produced during hydro-distillation. To address this gap, residues from seven hemp cultivars were analyzed for moisture (M = 87.27 %), volatile matter (VM = 64.83 % d.m.), fixed carbon (FC = 14.02 % d.m.), ash (A = 21.15 % d.m.), higher heating value (HHV = 15.92 MJ kg^{-1} d.m.), lower heating value (LHV = 12.48 MJ kg^{-1}), carbon (C = 36.99 % d.m.), hydrogen (H = 4.05 % d.m.), sulfur (S = 0.126 % d.m.), nitrogen (N = 3.17 % d.m.), chlorine (Cl = 0.126 % d.m.), cellulose (Cel = 18.88 % d.m.), hemicellulose (Hem = 19.11 % d.m.), lignin (Lig = 7.96 % d.m.), and total extractives (CWE, HWE, OSS = 54.05 % d.m.). The results were interpreted in the context of thermal and biochemical conversion potential. Although some parameters showed extreme values, they were generally comparable to other biomass types. Significant differences were found among cultivars, particularly for Finola, which showed a distinct profile in cluster analysis. These findings contribute new knowledge relevant to biomass valorization and circular economy practices involving industrial hemp.

1. Introduction

Climate change has increased the need to seek solutions for renewable energy sources (RES). Residue recovery for energy generation and removal of environmental pollution is a necessity. Biomass residues, which should be regarded as resources and evaluated for their usability, appear inevitably in various sectors (Akgül et al., 2014; Fidan et al., 2021). Currently, crops are grown not only for food but also for industrial use. These include medicinal and aromatic plants (MAP) (Alexandri et al., 2023; Deshmukh et al., 2015). MAPs can be defined as plants containing bioactive compounds which can have a beneficial impact on the human body. They are effectively used in healthcare, and they are components of essential oils (EO) (Yeşilyurt et al., 2024). This is favored by social attitudes as people are becoming more aware that natural products are safer and more sustainable than synthetic ones (de Elguea-Culebras et al., 2022). Growing MAPs for the EO production industry results in considerable amounts of waste (Hassouni et al., 2019). This waste arises not only from the distillation process, such as steam-, hydro- or microwave-assisted hydro-distillation used to extract the essential oils, but also from the production of hydrosol/hydrolate, water residue and spent plant material or solid residue (Christaki et al., 2022; Kwanga et al., 2022; Rafya et al., 2024a; Tavares et al., 2020; Veličković et al., 2008). Contrary to the conventional term "waste," this post-production biomass has the potential for use. It is neutral with respect to CO_2 emission and, according to the circular economy (CE) principles, it should be treated as a by-product (de Elguea-Culebras et al., 2022; Kumar et al., 2024). Moreover, it is easily available and, because of its origin, inexpensive (Lesage-Meessen et al., 2015).

Without a system of sustainable management, a growing demand for MAP may result in increasing amounts of waste. MAP residue has been shown to have a potential for use while increasing the cost-effectiveness of EO production (Irakli et al., 2021; Marcelino et al., 2023; Sánchez-Vioque et al., 2013). With the low efficiency of EO hydro-distillation (other issues including a long hydro-distillation time,

* Corresponding author at: University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, Plac Łódzki 3, Olsztyn 10–719, Poland.
E-mail address: mariusz.stolarski@uwm.edu.pl (M.J. Stolarski).

https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121800
Received 14 December 2024; Received in revised form 15 July 2025; Accepted 24 August 2025
Available online 30 August 2025
0926-6690/© 2025 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

large amounts of energy and water consumed), the share of plant residual material is very high (>92 % of input mass) (Apurva and Wasnik et al., 2024; Christaki et al., 2022; Kwanga et al., 2022; Luca et al., 2024; Psarrou et al., 2020; Saha and Basak, 2020). Given the above, the amount of distillation residue is expected to increase and will have to be processed. Solid residue can be discarded or landfilled, used as fertilizer, compost, litter, fodder, bioabsorbent, a chelating agent, bioactive phytochemicals, biopesticides, or used in culturing microorganisms or microbiological transformations (Abu Bakar et al., 2020; Christaki et al., 2022; de Elguea-Culebras et al., 2022; Deshmukh et al., 2015; Kokkora et al., n.d.; Lesage-Meessen et al., 2015; Mahmoudi et al., 2020; Psarrou et al., 2020; Veličković et al., 2008).

The phenolic profile of the solid residue is similar to that of the raw material (Miljanović et al., 2023; Skendi et al., 2022). Its solvent extract has been shown to contain phenols (casus blackcurrant, *Ribes nigrum* (Dvaranauskaite et al., 2008) and rosemary, *Rosmarinus officinalis* (Rafya et al., 2024b)). Moreover, the antioxidant mass transfer rate increases following oil extraction (leaves vs. leaf residue; casus rosemary) (Navarrete et al., 2011). Phenols have also been found in fringed lavender (*Lavandula dentata*), in which the residue contained more phenols and antioxidants than the material prior to distillation (Hassouni et al., 2019), but also in residue of common sage *Salvia officinalis* (Veličković et al., 2008), labdanum (*Cistus ladanifer*), lavandin (*Lavandula* × *intermedia*), holy flax (*Santolina rosmarinifolia*) and *Thymus mastichina* (Sánchez-Vioque et al., 2013). The residue of *Cupressus lusitanica* has also been assessed for its phenol content (Tavares et al., 2020). However, in the most holistic option, this residue has been used as an ingredient in wheat bread (Nouska et al., 2023).

Solid post-production/post-extraction residue can be used for energy generation by briquetting or pelleting, combustion, pyrolysis, gasification or biomethanization (Marcelino et al., 2023). The residue of lemon myrtle (*Backhousia citriodora*) has been used for bio-oil production (Abu Bakar et al., 2020), and pyrrolic acid obtained from rosemary in this process was studied (Ma et al., 2013). Pyrolysis of lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*) residue has also been proposed, and the fuel properties of bio-coal from *C. flexuosus* have been reported (Deshmukh et al., 2015). Akgül et al. (2014) demonstrated that the residue of damascene rose (*Rosa damascena*) can be gasified. Coniferous plants can also be a source of EO, and the residue is used for the production of wood chips (Fidan et al., 2021). The MAP potential for use in biorefineries has also been suggested (Alexandri et al., 2023). They can be used in the production of cellulose microfibers, cellulose and lignin (Alves-Ferreira et al., 2021; Bhiri et al., 2024). Production of cardboard boxes from clove *Syzygium aromaticum* residue is also a good example (Ratri et al., 2020).

Despite the literature reports on the utility of solid post-production/post-extraction residue, data concerning their chemical characteristics are scarce, and they are essential for its valuation and usability assessment (Chakravarty et al., 2023; Pulidori et al., 2023; Sánchez-Vioque et al., 2013; Skendi et al., 2022). In practice, residues of many species are landfilled because they can only be used to a limited extent (Irakli et al., 2023). Complete profiles of this biomass are still lacking, which is caused by the diversity of species/cultivars and the material origin (Irakli et al., 2021). Therefore, there is a topical research issue of seeking and valuating the residues of less examined plants (Baranauskienė et al., 2022). For example, solid residues of rosemary, lavender, thyme (*Thymus vulgaris*), common mugwort (*Artemisia vulgaris*) and fringed rue (*Ruta chalepensis*) were examined with respect to their C, H, O, N, S, ash content and higher heating value (HHV), and their specific profiles were created (Pulidori et al., 2023). This valuation is essential as it contributes to CE and is expected to have a positive impact on the socioeconomic situation (Alexandri et al., 2023). From a broader perspective, this approach allows for the examination of life cycles in various new scenarios, such as the production of damascene rose oil (Fereidani and Üçtuğ, 2023).

There is a need for studies to profile the residue produced during various processes. This suggests the importance of research focused on understanding different types of residues, as each application should utilize these residues efficiently. Additionally, industrial hemp is another appealing raw material, and its chemical extraction should enable the effective use of hydro-distillation residues (Fidan et al., 2021; Kaur and Ahmed, 2021; Robertson et al., 2023). A long-standing ban on research and development has created a significant knowledge gap regarding this plant, which is now more important than ever. This gap has emerged due to a renewed global interest in the commercial production of hemp, which is making a comeback in agricultural fields (Dudziec et al., 2024; Fike et al., 2020; Mayton et al., 2022; Zheljazkov et al., 2020). Producers need to be provided with comprehensive information to support their activities, which includes characteristics of solid residue from EO hydro-distillation. Notably, the multifaceted usability of industrial hemp still attracts interest and is being explored, which opens space for the commercial valuation of its products (Višković et al., 2024). When it comes to solid hemp distillation residue, the properties examined so far include the phytochemical composition and antimicrobial properties of flower extracts (Luca et al., 2024). However, no research has been conducted to characterize the composition and properties of solid hemp hydro-distillation residue. These authors have not found any publication on industrial hemp containing such data. This is extremely important as essential oil output from hemp can be as small as 0.1 % (% v/w) (Strzelczyk et al., 2023).

Therefore, the main objective of the current study was to determine the composition and properties of solid hydro-distillation residue for seven cultivars of industrial hemp. The study covered the parameter variation at the proximate and ultimate analysis levels. Moreover, changes in the share of lignocellulose components and three types of extracts were determined. A novel aspect of the study involved an analysis of the composition of solid hydro-distillation residue from hydro-distillation of biomass fraction remaining after separating stems and ripe nuts (leaves, flowers, not fully developed seeds, etc.). Therefore, EO was obtained not from the target raw material (flowers) but from the residue, and only the 'next' solid residue produced from it was subjected to analyses of its profile.

2. Materials and methods

2.1. Study object

Seven cultivars of industrial hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) were harvested in September and October 2023 (cultivars: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8 fc, Kompolti, Finola) as part of the experiment conducted at the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, located in north-eastern Poland (coordinates: 53.710115503930176, 20.434934578229374). Each cultivar was cultivated in two variants: with flower harvest and without flower harvest during the blossoming period. The flower harvest involved cutting off the panicles of female plants located at apices of the main stems by hand (maximum 15 cm was cut off). Therefore, the field experiment was based on two factors (factor 1. cultivar – seven levels of the factor, factor 2. flower harvest - two-factor levels), and it was carried out in the randomized block design with three replicates. Therefore, there were a total of 42 plots in the experiment. Fourteen different biomass yield levels were obtained (considering the replicates = 42 samples).

The stems were dried conventionally after harvest. They were stored in closed rooms (barns) with access to open air. Stems were isolated by hand from air-dried hemp shoots. Subsequently, nuts were separated from the remaining material. A laboratory separator (type SZD; Bakery Industry Research Institute, Poland) for determining the mass of purified grain was used for this purpose. A biomass fraction remaining after separating stems and ripe nuts was obtained in the process. The material can be described more precisely as green concentrate/bioconcentrate

from threshing. This fraction is comprised of leaves, flowers, green and brown calyces forming the nut cover, green calyces with unripe nuts, empty nuts and seeds, and small twigs constituting the axes of inflorescences. The bioconcentrate was hydro-distilled as per the standards PN-EN ISO 6571 and PN-EN ISO 6571:2009/A1. Fifty grams of the bioconcentrate was sampled into each of 1 L flasks, 600 mL of distilled water was added, and the whole was hydro-distilled for four hours (counting from the moment it started boiling). The solid residue was strained on a laboratory sieve and separated from the water residue. Subsequently, it was cooled down and frozen.

2.2. Laboratory analyses

Each material sample was thawed, and its moisture (M) content was determined. The samples were dried at 105 °C to a constant mass in an FD BINDER drier (PN-EN ISO 18134–1:2015). Subsequently, the dried samples were ground in an analytical mill with a 1 mm mesh (Retsch SM 200). They were then kept in plastic bags.

The ash (A), volatile matter (VM) and fixed carbon (FC) content were determined in an Eltra Tga-Thermostep thermogravimetric oven. The percentage content of ash (A) was determined at 550 C (PN-EN ISO 18122:2016–01), while that of VM was determined at 650 C (PN-EN ISO 18123:2016–01). The VM content was determined by the loss of mass, adjusted for moisture content, after the material's partial pyrolysis in the oven. Therefore, the FC content was calculated as the difference between VM and A.

The total carbon (C), hydrogen (H) and sulfur (S) content was established with an automatic ELTRA CHS 500 analyzer (PN-EN ISO 16948:2015–07 and PN-EN ISO 16994:2016–10). The nitrogen (N) content was determined by the Kjeldahl method with a K-435 mineralizer and a BUCHI B-324 distilling device. The chlorine (Cl) content was determined as per the PN-ISO 587:2000 standard by sample combustion (in an oxidizing atmosphere, in direct contact with the Eschka mixture).

The higher heating value (HHV) was determined by the dynamic method at a constant volume and at the reference temperature of 25 °C in an IKA C2000 bomb calorimeter. Lower heating value (LHV) was calculated for an air-dry state (at the moisture content of 15 %) based on HHV, M content and H content (PN-EN ISO 18125:2017–07). Before assays were performed to establish the HHV, C, H and S content, the samples were placed in laboratory containers, then put into a drier (105 °C), analytical samples were collected from them, and the analyses were performed.

The samples were put into F57 filtration bags (ANKOM Technology) in order to determine the content of cold-water extracts (CWE). Subsequently, they were extracted with distilled water (20–25 °C) for 48 h, washed twice in an ANKOMA200 apparatus and dried at 105 °C. CWE was calculated as the mass difference. Hot-water extracts (HWE) were determined in a similar manner. The samples were extracted for 3 h at 100 °C. Subsequently, they were dried at 105 °C and weighed. A, VM, FC, C, H, N, S, Cl, HHV, CWE, and HWE were determined on a dry mass basis (d.m.).

Assays to establish the content of neutral detergent fiber (NDF) (PN-EN ISO 16472:2007), acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignin (ADL) were performed on the Ankom A200 extraction system (PN-EN ISO 13906:2009). The lignin (Lig), cellulose (Cel) and hemicellulose (Hem) content was calculated using the sample mass differences. The HWE and NDF content was used to calculate the amounts of other soluble substances (OSS) for the dry state in sodium lauryl sulfate and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA). All parameters were determined in triplicate.

2.3. Statistical analysis

The Shapiro-Wilk test was used to verify the normality of the attributes under study. Subsequently, an ANOVA statistical analysis was performed. This was based on a two-way analysis of variance with the following main factors: industrial hemp cultivar (seven factor levels: Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8 fc, Kompolti, Finola) and the type of the solid hydro-distillation residue (bioconcentrate samples from the plants whose flowers were harvested during the blossoming period and from those whose flowers were not harvested). In order to assess what part of the total variation of an attribute was explained by a statistically significant main factor, its percentage share in the square sum (SS) was calculated. The arithmetic mean and the standard deviation were calculated for each parameter. Homogeneous groups were identified with Tukey's honestly significant difference (HSD) multiple-comparison test at the level of significance of $p < 0.05$. The Pearson correlation coefficient was determined ($p < 0.05$) for the parameters under analysis. An agglomerative hierarchical clustering analysis was performed for the qualitative and quantitative attributes. The input data were standardized in columns. Agglomeration was performed using Ward's method, and the Euclidean distance was used to measure distance. The Sneath criterion isolated clusters at the cut-off significance of 66 % and 33 % D_{max} (the maximum measure of distance D). The cluster analysis resulted in a dendrogram showing similarities between 7 solid hydro-distillation residues differentiated with respect to cultivar.

3. Results and discussion

3.1. Proximate analysis

The moisture (M) content of solid hydro-distillation residue was not significantly differentiated by either of the main factors (cultivar, flower harvest) or interactions between them (Table 1). The other parameters such as volatile matter (VM), fixed carbon (FC) and ash (A), were differentiated significantly only by the cultivar. The mean M was 87.27 %, with a standard deviation of 1.10 % (Table 2).

The absence of significant differentiation of M by either of the factors is not surprising because each material batch was obtained as part of the same process under the same hydro-distillation conditions. Such high moisture content can also be found in other biofeedstock types, e.g., poultry manure (80 %) (de de de Holanda Pasolini et al., 2024) and dewatered sludge (approximately 80 %) (Shen et al., 2023). In some biomass types moisture content can reach 90 −93.4 % (Adeleke et al., 2021; Bharathiraja et al., 2018; Mrosso et al., 2023). Biomass with this moisture content level must be deeply dehydrated (e.g., mechanically) and/or dried so that it can be properly stored (prevention of mold and bacterial infection) and used in the combustion process (Czekała et al., 2023; Shen et al., 2023). However, this parameter level in can be preferred when it is used in biomethane production (moisture enhances biochemical conversion – it boosts the growth of methanogenic bacteria and facilitates their movement and nutrient transport) (Bharathiraja et al., 2018; Mrosso et al., 2023).

VM content was differentiated significantly only by the cultivar. The cultivars included only in the extreme homogeneous groups ("a" and "c") differed by 9.51 percentage points (pp) (Table 2), i.e., more than 16 %. The highest VM content was established in solid hydro-distillation residue of Santhica 70 (67.86 % d.m.), and the lowest was in Finola (58.35 % d.m.). The mean VM content was 64.83 % d.m., with a standard deviation of 3.75 % d.m. The greatest variation was observed in Finola (standard deviation = 4.36 % d.m.). The smallest was in the residue from Santhica 70 (0.74 % d.m.).

The VM content of biomass can reach 90 % d.m., with higher VM content levels resulting in larger amounts of biogas produced and promoting the pyrolysis process (generation of bio-oil and syngas) (Allende et al., 2023; Azeta et al., 2021; Madhu et al., 2020; ÖzyuğUran and Yaman, 2017). Compared with wood (VM content = approximately 78 −85 % d.m. (Malico et al., 2019)), the mean VM content of solid hydro-distillation residue was as much as 20 % lower. On the other hand, some biofeedstock types contain even less VM, e.g., rice hulls (38.80 % d.m.) (Malico et al., 2019).

Table 1
Results of analysis of variance (ANOVA) – p values for the studied attributes.

Source of variation	M	VM	FC	A	HHV	LHV	C	H	S	N	Cl
Cultivar (C)	0.082	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	0.004*	0.008*	< 0.001*	0.030*
Flower harvest (F)	0.158	0.250	0.239	0.178	0.503	0.515	0.690	0.690	0.088	0.256	0.856
C × F	0.530	0.336	0.897	0.369	0.550	0.592	0.599	0.784	0.499	0.423	0.639

* significant values ($p < 0.05$)

Table 2
The proximate analysis of solid hydro-distillation residue depending on the cultivar and flower harvest.

Source of variation	Item	M (%)	VM (% d.m.)	FC (% d.m.)	A (% d.m.)
Cultivar	Białobrzeskie	87.16 ± 0.71	67.22 ± 1.24 ab	14.20 ± 0.17 b	18.59 ± 1.19 bc
	Henola	87.63 ± 0.62	63.37 ± 1.69 b	14.30 ± 0.77 bc	23.32 ± 2.37 b
	Santhica 27	87.68 ± 0.52	66.11 ± 2.35 ab	14.69 ± 0.75 ab	19.21 ± 1.84 bc
	Santhica 70	86.26 ± 0.98	67.86 ± 0.74 a	15.68 ± 1.00 a	16.46 ± 0.98c
	Earlina 8 fc	87.86 ± 0.44	65.45 ± 1.88 ab	13.42 ± 0.31 bc	21.13 ± 2.03 bc
	Kompolti	86.66 ± 2.02	65.41 ± 3.00 ab	14.36 ± 0.87 ab	20.22 ± 3.72 bc
	Finola	87.66 ± 0.96	58.35 ± 4.36c	12.52 ± 0.76c	29.13 ± 4.95 a
Flower harvest	with flower harvest	87.05 ± 1.36	64.39 ± 4.52	13.88 ± 1.21	21.73 ± 5.44
	without flower harvest	87.50 ± 0.73	65.26 ± 2.83	14.16 ± 1.15	20.57 ± 3.70
Mean		87.27 ± 1.10	64.83 ± 3.75	14.02 ± 1.18	21.15 ± 4.63

[a,b,c] homogenous groups for the main source of variation and their interaction separately for each attribute, no letter denotes an absence of significance; ± – standard deviation

The mean fixed carbon (FC) content was 14.02 % d.m., with a standard deviation of 1.18 % d.m. (Table 2). Among all the cultivars, Finola contained at the lowest level (12.52 % d.m.; homogeneous group "c"), and Santhica 70 contained the highest (15.68 % d.m.; group "a"). The intra-group variation for an individual cultivar did not exceed 1.00 % d.m. As with the other parameters, flower harvest did not significantly differentiate the biomass (Table 1).

The residue under analysis contained similar FC levels compared with raw wood (15.23 % d.m.), waste wood from processing plant (15.07 % d.m.) and cow manure (14.7 % d.m.) (Bosch et al., 2022; Ghodake et al., 2021; Stolarski et al., 2022). However, no cultivar reached the levels comparable with hemp stalks (16 –17 % d.m.) (Chaowana et al., 2024). FC is crucial as a potential biofuel component, being a major source of heat during combustion (increases HHV) (Kebede et al., 2022; Suárez-Rivero et al., 2021). Moreover, its higher content increases the amount of biochar produced in pyrolysis (Mari Selvam and Balasubramanian, 2023).

The mean A content, depending on the cultivar, ranged from 16.46 % to 29.13 % d.m. (Table 2). The smallest were found in Santhica 70 (16.46 % d.m.), and the largest amounts were found in Finola (29.13 % d.m.). Those were the cultivars included in the extreme homogeneous groups "a" and "c" (the span was 12.68 pp, i.e., nearly 77 %). The greatest and the smallest variation was found in the two cultivars (0.98 % d.m. for Santhica 70 vs. 4.95 % d.m. for Finola). The mean content of all the samples was 21.15 % d.m., with a standard deviation of 4.63 % d.m.

Irrespective of the cultivar, the biomass under analysis contained high ash levels, i.e., > 10 % (medium ash-containing biomass – 5–10 %; low ash-containing biomass – <5 %) (Stella Mary et al., 2016). An equally high content as in the analyzed residue was detected in other biomass, e.g., rice hulls (16 –23 % d.m.), cotton Gin thrash (17.2 % d.m.) digestate (15 –48.9 % d.m.) (Munawar et al., 2021; Ogwang et al., 2021). Such a high ash content level can cause many issues in a thermal conversion process: sintering, slag deposition or agglomeration (Puri et al., 2024). On the other hand, biomass containing high ash levels can be a valuable buffering addition (counteracting acidification and process instability) in biogas plants, replacing commercial alkaline reagents. It can also supplement the macro- and micro-nutrients that are essential for the activity of anaerobic microorganisms in the fermentation process. This leads to an overall improvement of the process, although the decisive factor is the ash composition (Alavi-Borazjani et al., 2020).

The ash content is often affected by impurities present in biomass (Cavalaglio et al., 2020). The highest ash content was determined in the Finola and Henola cultivars, i.e., those with the lowest height, with thick and "lush" inflorescence covering most of the stalk. These cultivars' inflorescence is highly likely to have been more susceptible to contamination with soil particles carried by wind during the vegetation period. This resulted in the highest ash content of all the solid hydro-distillation residues.

3.2. Ultimate analysis

In the ultimate analysis – carbon (C), hydrogen (H), sulfur (S), nitrogen (N), chlorine (Cl), the highest statistically significant correlations were found between C and VM (0.79), C and H (0.79), C and A (-0.77), C and higher heating value (HHV) (0.76), and between C and lower heating value (LHV) (0.72) (Table 3). These correlations were high and indicative of a very strong relationship between these parameters. Higher significant correlations (>0.72) in the whole group under analysis (Table 3) were found only between: A and FC (-0.80), LHV and VM (-0.89), LHV and A (-0.89), HHV and VM (0.90), HHV and A (-0.91) and A and VM (-0.98). Therefore, these relationships should be regarded as typical of solid hydro-distillation residue, at least for industrial hemp. Although some components of solid hydro-distillation residue were identified in certain studies (Fidan et al., 2021; Kokkora et al., n.d.; Pulidori et al., 2023), no correlations were found between the parameters that were examined analytically. The correlations found in this study are highly likely to be typical of the whole group of solid hydro-distillation residues (for various plant species and/or MAPs). This would allow for approximating the non-determined parameters for other solid hydro-distillation residues based on the precisely and analytically defined parameters, e.g., by determining regression equations/lines.

The highest correlation and the most dependable relationship among the parameters under analysis (Table 3) was found between HHV and LHV, but this only resulted from the methodology applied for calculating the LHV, and this is obvious. The lowest significant correlation was found between N and Cl (-0.31). Although this is a low correlation, it is a definite relationship. Similar correlations between these two parameters were determined for woodchips and *Artemisia dubia* pellet (Jasinskas et al., 2024; Mancini et al., 2020). The correlation significance not being determined in the former case and not being significant in the latter.

The mean C content was 36.99 % d.m., with a standard deviation of

Table 3
Simple correlation coefficient between the analysed attributes.

Item	VM	FC	A	HHV	LHV	C	H	S	N	Cl
M	−0.11	−0.23	0.15	0.03	0.06	−0.20	−0.26	0.10	0.09	0.21
VM		0.67*	−0.98*	0.90*	0.89*	0.79*	0.69*	0.38*	−0.06	0.29
FC			−0.80*	0.68*	0.67*	0.52*	0.53*	0.36*	0.04	−0.16
A				−0.91*	−0.89*	−0.77*	−0.69*	−0.40*	0.04	−0.20
HHV					1.00*	0.76*	0.60*	0.35*	0.12	0.27
LHV						0.72*	0.54*	0.33*	0.13	0.27
C							0.79*	0.44*	−0.06	0.25
H								0.40*	−0.11	0.17
S									0.27	0.17
N										0.31*

* significant values ($p < 0.05$)

3.24 % d.m. (Table 4). This is definitely less than in typical raw biomass types, such as straw (45.93 % d.m.), wood (49.01 % d.m.), bark (49.66 % d.m.), poplar SRC (48.48 % d.m.) or miscanthus (47.97 % d.m.) (Saleh et al., 2014). Interestingly, a similar mean C content was not achieved for any cultivar. The largest amounts were found in the Białobrzeskie (41.35 % d.m.) and the lowest in Finola (31.90 % d.m.) (homogeneous groups "a" and "c", respectively). The variation for none of the cultivars was higher than 2.54 % d.m. or lower than 1.50 % d.m. The flower harvest was not statistically significant for C or for the other parameters included in the ultimate analysis (Table 4).

Teixeira et al. (2024) analyzed the wood biomass of 46 species with respect to, *inter alia*, the C content. The lowest values were found in *Ginkgo biloba* (34.49 % d.m.) and *Calocedrus decurrens* (36.88 % d.m.), and those were tree species containing C at levels similar to residue. Therefore, the residue can be, to a certain extent, a feedstock of a similar value to the wood biomass of certain species (especially if one takes into account the potential for thermal conversion). The C is a critical parameter that determines the biomass energy potential, with higher C content being usually correlated to higher HHV. A relatively lower C content is usually linked with biomass, which gives poorer energy-related results in combustion compared with species containing more C (Teixeira et al., 2024). This was the case for the residue under analysis – the C–HHV correlation was 0.76, and C–LHV was 0.72 (Table 3). Similarly, the C content determines the biomass potential for biogas production (Thakur et al., 2022).

Residue was significantly differentiated in terms of the H, S, N and Cl content, but rather weakly (Table 4). Two homogeneous groups ("a" and "b") were identified for each of the parameters, and several cultivars (3–5, depending on the parameter) were included in both groups for H, S and Cl. Only in the case of the N content was each cultivar included either in a homogeneous group "a" or "b". Therefore, the cultivars were separated into two groups – "a" containing higher N levels and "b" – with a lower.

Santhica 27 (4.30 % d.m.), Santhica 70 (4.23 % d.m.) and Kompolti (4.18 % d.m.) were included only in the homogeneous group "a" (with the highest H content) (Table 4). Finola (the lowest H, 3.50 % d.m.) was included only in group "b". The other cultivars were in groups "a" and "b". In general, the mean H content with no differentiation was 4.05 % d.m., and the variation expressed by the standard deviation was 0.37 % d.m.

The mean H content was lower compared with wood as sawdust (6.75 % d.m.) and wood slabs (6.53 % d.m.) (Dudziec et al., 2023) as well as with most biomass feedstock types (commercial fuels, industrial waste, forest waste, energy crops and cereals). It was comparable only with selected feedstock types, e.g., with sorghum (4.38 % d.m.) (Güleç et al., 2022). The H is usually reflected in the heating value (Tang et al., 2020), which was also confirmed by the correlation for residue (Table 3). Higher HHV levels are achieved when biomass samples contain more H (Nivash and Sakthivadivel, 2024).

The mean S content was 0.126 % d.m., with a standard deviation of 0.038 % d.m. (Table 4). The lowest S content was detected in the Earlina 8 fc (0.081 % d.m.), which was only included in the homogeneous group "b". On the other hand, the highest S were determined in Henola (0.141 % d.m.) and Santhica 27 (0.154 % d.m.), included only in homogeneous group "a". The difference between these extreme cultivars was 0.06 –0.073 pp, i.e., 74 –90 %. The maximum intra-group differentiation with respect to the cultivar was 0.048 % d.m. (Santhica 27).

The mean S established in the residue was higher than in biomass of SRC (0.032 % d.m.), forest tree branches (0.024 % d.m.) and straw (0.088 % d.m.) (Mariusz Jerzy Stolarski et al., 2024a; Mariusz Jerzy Stolarski et al., 2024b; Stolarski and Mariusz et al., 2024). On the other hand, was lower compared with manure (0.22 or 0.45 % d.m., depending on the group of bred animals) (Gajera et al., 2023; Sitka et al., 2021). The combustion of sulfur-containing material releases its volatile components, which subsequently react with hydrogen (forming hydrogen sulfide) or with oxygen (forming sulfur dioxide). A low S content level in this biofeedstock should result in small emissions of these gases from combustion and a lower corrosion risk (sulfur compounds condense on the surface of a boiler exchanger) (Lisý et al., 2020). Moreover, the presence of S can have an impact on the amount and quality of biogas. Although S is essential for microorganism metabolism, high levels of S can lead to the formation of excessive amounts of

Table 4
The ultimate analysis of solid hydro-distillation residue depending on the cultivar and flower harvest.

Source of variation	Item	C (% d.m.)	H (% d.m.)	S (% d.m.)	N (% d.m.)	Cl (% d.m.)
Cultivar	Białobrzeskie	41.35 ± 1.50 a	4.07 ± 0.42 ab	0.140 ± 0.025 ab	3.19 ± 0.09 a	0.143 ± 0.026 ab
	Henola	36.50 ± 1.93 b	4.02 ± 0.27 ab	0.141 ± 0.009 a	3.29 ± 0.18 a	0.153 ± 0.043 a
	Santhica 27	37.99 ± 1.94 ab	4.30 ± 0.20 a	0.154 ± 0.048 a	3.23 ± 0.12 a	0.113 ± 0.032 ab
	Santhica 70	37.91 ± 1.55 ab	4.23 ± 0.24 a	0.135 ± 0.046 ab	3.35 ± 0.08 a	0.120 ± 0.015 ab
	Earlina 8 fc	35.81 ± 1.54 b	4.06 ± 0.19 ab	0.081 ± 0.012 b	2.97 ± 0.09 b	0.143 ± 0.024 ab
	Kompolti	37.51 ± 2.53 b	4.18 ± 0.36 a	0.124 ± 0.033 ab	2.79 ± 0.13 b	0.093 ± 0.029 b
	Finola	31.90 ± 2.54c	3.50 ± 0.33 b	0.104 ± 0.034 ab	3.36 ± 0.10 a	0.116 ± 0.035 ab
Flower harvest	with flower harvest	36.87 ± 3.52	4.03 ± 0.43	0.117 ± 0.040	3.19 ± 0.24	0.125 ± 0.037
	without flower harvest	37.12 ± 3.01	4.07 ± 0.31	0.134 ± 0.036	3.15 ± 0.21	0.127 ± 0.032
Mean		36.99 ± 3.24	4.05 ± 0.37	0.126 ± 0.038	3.17 ± 0.23	0.126 ± 0.034

[a,b,c] homogenous groups for the main source of variation and their interaction separately for each attribute, no letter denotes an absence of significance; ± – standard deviation

undesired hydrogen sulfide (which is a poisonous and corrosive gas) (Sihlangu et al., 2024).

The cultivar explained up to 77 % of the variation of the N content in residue. This is the highest value of all the determined parameters (Table 5). The mean N was 3.17 % d.m., and the differentiation was 0.23 % d.m. (Table 4). Homogeneous group "a" included the hemp cultivars with the highest mean N content levels (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70 and Finola), ranging from 3.19 % to 3.36 % d.m. On the other hand, group "b" included cultivars with the lowest N content levels (Kompolti and Earlina 8 fc, mean N content: 2.79 and 2.97 % d.m., respectively). The difference between these groups was 0.22 −0.57 pp (i.e., 7 −20 %).

Lower N levels are beneficial for combustion as they are accompanied by the formation of nitrogen oxides at lower concentrations (these gases are regarded as hazardous and corrosive, and they are air pollutants) (Nivash and Sakthivadivel, 2024). Furthermore, biomass containing higher N levels may be of key importance in seeking the optimum biogas plant feedstock, which is a combination of various waste types. Organic materials with higher N levels tend to stimulate microorganism activity, which accelerates decomposition and boosts biogas production. Nevertheless, the composition of the whole feedstock is important, as an excessive amount of N may lead to problems (toxic properties of ammonia and process instability) (Sihlangu et al., 2024). The mean N content determined in residue was higher both compared with manure (1.6 or 2.24 % d.m., depending on the animal group), straw (0.88 % d.m.) and wood (0.25 % d.m.) (Gajera et al., 2023; Mariusz Jerzy Stolarski et al., 2024a; Sitka et al., 2021; Stolarski et al., 2022).

The mean Cl content was 0.126 % d.m., with a standard deviation of 0.034 % d.m. (Table 4). The lowest was detected in Kompolti (0.093 % d.m.), and the highest in Henola (0.153 % d.m.). These cultivars were only included in homogeneous groups "b" and "a", respectively. Although the cultivar was the only factor responsible for the significant differentiation of samples, it explained only 34 % of the variation of Cl content (Table 5). The Cl were significantly correlated only with N (Table 3).

A high Cl content of biomass facilitates the formation of alkaline metal compounds with low melting points during the combustion process, as well as corrosive gases, such as HCl and Cl_2. Moreover, it increases the emissions of these pollutants into the atmosphere. These substances may cause the depositing of ash, slagging and corrosion on the boilers' heat-exchanging surfaces which, in turn, reduces the boiler efficiency (Król et al., 2022; Tang et al., 2024). The Cl is also important in anaerobic fermentation (biogas production), as this element inhibits microorganism growth (Tamilselvan and Selwynraj, 2024). The chlorine level was much higher compared with poplar SRC (0.009 % d.m.) and clean wood waste (0.0563 % d.m.) (Gehrmann et al., 2020; Stolarski et al., 2020). On the other hand, it was lower than in cow dung (0.54 % d.m.) and straw (0.174 % d.m.) (Maj et al., 2021; Mariusz Jerzy Stolarski et al., 2024a).

3.3. Thermophysical properties

The mean HHV lay within the range between 14.64 and 16.69 MJ kg^{-1} d.m., depending on the cultivar, and the intra-group differentiation (from 0.31 to 0.94 MJ kg^{-1} d.m.) (Table 6). The cultivar with the lowest HHV – Finola (homogeneous group "b") also had the greatest dispersion of this parameter. The cultivars with the highest mean HHV, i.e. Santhica 70 (16.69 MJ kg^{-1} d.m.), Santhica 27 (16.09 MJ kg^{-1} d.m.) and Earlina 8 fc (16.06 MJ kg^{-1} d.m.), were included only in homogeneous group "a". The mean HHV was 15.92 ± 0.89 MJ kg^{-1} d.m.

Table 6
The thermophysical properties solid hydro-distillation residue depending on the cultivar and flower harvest.

Source of variation	Item	HHV (MJ kg^{-1} d.m.)	LHV (MJ kg^{-1})
Cultivar	Białobrzeskie	16.66 ± 0.48 a	13.10 ± 0.43 a
	Henola	15.63 ± 0.90 ab	12.24 ± 0.74 ab
	Santhica 27	16.09 ± 0.56 a	12.58 ± 0.45 a
	Santhica 70	16.69 ± 0.31 a	13.10 ± 0.27 a
	Earlina 8 fc	16.06 ± 0.63 a	12.60 ± 0.51 a
	Kompolti	15.68 ± 0.47 ab	12.25 ± 0.37 ab
	Finola	14.64 ± 0.94 b	11.48 ± 0.76 b
Flower harvest	with flower harvest	15.85 ± 1.04	12.42 ± 0.83
	without flower harvest	15.99 ± 0.74	12.53 ± 0.60
Mean		15.92 ± 0.89	12.48 ± 0.72

[a,b,c] homogenous groups for the main source of variation and their interaction separately for each attribute, no letter denotes an absence of significance; ± – standard deviation

HHV is an important parameter for designing and subsequent operation of biomass-based power systems. It represents the maximum potential energy that can be recovered from biomass (Ghiasi et al., 2024). The mean HHV was close to that from dairy cow manure (16.0 MJ kg^{-1} d.m.) and corncob (15.8 MJ kg^{-1} at moisture content = 9.0 %) (Kazimierski et al., 2022; Marin-Batista et al., 2020).

The relative calculated LHVs were assigned to homogeneous groups (at a moisture content of 15 %) in the same manner as in the case of HHV (Table 6). The highest was for Białobrzeskie and Santhica 70 (both 13.10 MJ kg^{-1}), and the lowest for Finola (11.48 MJ kg^{-1}). The intra-group differentiation lay within the range from 0.27 MJ kg^{-1} (Santhica 70) to 0.76 MJ kg^{-1} (Finola). The mean LHV was 12.48 MJ kg^{-1}, and the standard deviation was 0.72 MJ kg^{-1}.

These LHVs were determined for the air-dry state (at a moisture content of 15 %), i.e., they depended solely on HHV and the H content. The mean LHV was lower compared with that determined for willow (15.95 MJ kg^{-1}), sawdust (15.82 MJ kg^{-1}) and triticale (13.83 MJ kg^{-1}) (Chiang et al., 2012; Heinz et al., 2001). On the other hand, it was similar to that determined for park waste chip (12.61 MJ kg^{-1}) (Zhang et al., 2015).

3.4. Lignocellulosic composite

Like the other parameters, cellulose is significantly differentiated by the cultivar (Table 7). The flower harvest, in turn, differentiated significantly only cold- and hot-water extracts. The interactions between these two factors proved statistically non-significant for each of the parameters under analysis.

Residue contained a mean of 18.88 % d.m. cellulose (Cel), with a differentiation of 1.97 % d.m. (Table 8). The highest content was determined in Finola (20.70 % d.m.), and the lowest in Earlina 8 fc (16.82 % d.m.). These two cultivars differed considerably from the others as they were included only in the extreme homogeneous groups (homogeneous group "a" and "c", respectively).

It has been reported that cellulose HHV is identical regardless of the species. Several authors have obtained similar results for different cellulose types, e.g., 17.22 −17.56 MJ kg^{-1}, which lies within the error range and is close to 17.36 MJ kg^{-1} reported for starch (a D-glucose homopolymer, like cellulose). Therefore, the Cel content is a determinant of HHV (Esteves et al., 2023). Moreover, a higher Cel content of

Table 5
The percentage share of effects in the total variation for all features.

Source of variation	VM	FC	A	HHV	LHV	C	H	S	N	Cl
Cultivar	64*	68*	69*	55*	54*	68*	44*	38*	77*	34*

* significant values ($p < 0.05$)

Table 7
Results of analysis of variance (ANOVA) – p values for the studied attributes.

Source of variation	Cel	Hem	Lig	CWE	HWE	OSS
Cultivar (C)	0.001*	0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*
Flower harvest (F)	0.752	0.075	0.197	0.029*	0.015*	0.239
C × F	0.572	0.333	0.376	0.512	0.581	0.897

* significant values ($p < 0.05$)

Table 8
Cellulose, hemicellulose and lignin content of solid hydro-distillation residue depending on the cultivar and flower harvest.

Source of variation	Item	Cel (% d.m.)	Hem (% d.m.)	Lig (% d.m.)
Cultivar	Białobrzeskie	18.34 ± 2.08 abc	15.44 ± 0.81c	8.46 ± 1.10 ab
	Henola	19.75 ± 1.90 ab	22.60 ± 1.94 ab	8.31 ± 0.67 ab
	Santhica 27	19.27 ± 0.95 abc	15.88 ± 1.15c	8.46 ± 0.51 ab
	Santhica 70	20.13 ± 1.03 a	16.09 ± 1.20c	7.95 ± 1.31 abc
	Earlina 8 fc	16.82 ± 1.35c	19.10 ± 1.43 bc	8.82 ± 0.57 a
	Kompolti	17.17 ± 1.72 bc	18.83 ± 3.73 bc	7.04 ± 1.03 bc
	Finola	20.70 ± 1.14 a	25.80 ± 4.97 a	6.66 ± 0.56c
Flower harvest	with flower harvest	18.81 ± 2.13	19.82 ± 5.44	8.13 ± 1.05
	without flower harvest	18.96 ± 1.85	18.40 ± 2.88	7.79 ± 1.16
Mean		18.88 ± 1.97	19.11 ± 4.36	7.96 ± 1.10

[a,b,c] homogenous groups for the main source of variation and their interaction separately for each attribute, no letter denotes an absence of significance; ± – standard deviation

biomass indicates its slightly higher flammability (Gani et al., 2024). However, when it comes to biogas production, methane output is strongly correlated with the cellulose content (Mirmohamadsadeghi et al., 2021). Residue contained low levels of Cel compared with agricultural biomass (44.70 % d.m.), wood biomass (44.04 % d.m.) and dairy cow manure (31.71 % d.m.) (Brandić et al., 2024; Rehman et al., 2017). However, it was higher than in cattle slurry (14.6 % d.m.), chicken manure (14.49 % d.m.) and cattle manure (8.4 % d.m.) (Nielsen et al., 2020; Rehman et al., 2017). This mean content also lay within the range reported for biogas digestate (9.9 –23.9 % d.m.; this range does not include biogas digestate mix liquid) (Nielsen et al., 2020).

Residue contained more hemicellulose (Hem) compared with cellulose (19.11 > 18.88 % d.m.) (Table 8). However, the internal differentiation was higher for hemicellulose (4.36 > 1.97 % d.m.), and some cultivars (Białobrzeskie, Santhica 27 and Santhica 70) contained more Cel than Hem. The largest mean Hem amount was found in Finola (25.80 % d.m.; homogeneous group "a"), and the smallest – Białobrzeskie, Santhica 27 and Santhica 70 (15.44 –16.09 % d.m.; only in homogeneous group "c"). The highest internal differentiation with respect to Hem was observed in Finola (4.36 % d.m.), and the lowest was in Białobrzeskie (0.81 % d.m.). Among the lignocellulose components and extracts, the cultivar explained the variation in Hem content to the greatest extent (69 %) (Table 9). With both parameters (Cel and Hem) taken into account, the total mean holocellulose content of the material under analysis was 37.99 % d.m. (Table 8).

Table 9
The percentage share of effects in the total variation for all features.

Source of variation	Cel	Hem	Lig	CWE	HWE	OSS
Cultivar	50*	69*	47*	62*	64*	51*

* significant values ($p < 0.05$)

Although there are different types of hemicellulose, and this is different from cellulose, their HHV levels do not differ much due to similar chemical structures. However, correlations based solely on the hemicellulose content are of very poor quality (Domingos et al., 2020; Esteves et al., 2023). When it comes to biogas production, Hem is broken down by bacteria, and it is susceptible to anaerobic fermentation, due to which it correlates strongly with methane output (Mirmohamadsadeghi et al., 2021). Generally, the mean Hem content was lower compared with wood biomass (27.25 % d.m.), agricultural biomass (23.21 % d.m.) and chicken manure (21.66 % d.m.) (Brandić et al., 2024; Rehman et al., 2017), but not as significantly as that of Cel. This component's content was higher when compared with cattle manure and cattle slurry (3.2 and 14.1 % d.m., respectively) and with dairy cow manure (16.79 % d.m.) (Nielsen et al., 2020; Rehman et al., 2017). It also surpassed biogas digestate in this regard (6 –18.2 % d.m.; this range does not include biogas digestate mix liquid) (Nielsen et al., 2020).

Solid hydro-distillation residue contained lignin (Lig) at a mean of 7.96 ± 1.10 % d.m. (Table 8). Regarding the differentiation of individual cultivars, it was the lowest among all the lignocellulose components – five cultivars were included in at least two homogeneous groups. There were two outliers. Earlina 8 fc with the highest Lig content (8.82 % d.m.), representing only the homogeneous group "a" and Finola, with the lowest (6.66 % d.m.), representing only the "c".

Lignin has several different chemical structures (depending, e.g., on the type of biomass), whereby it is a weak parameter for the heating value prediction (Esteves et al., 2023). An increase in the share of Lig in the chemical structure of biomass results in an increase in HHV, as the HHV of Lig is considerably higher compared with Cel and Hem (Domingos et al., 2020). Moreover, if the Lig content is higher than that of Cel, biomass burns slightly longer (Gani et al., 2024). The presence of Lig in biogas production reduces biomass porosity, which hinders Cel and Hem decomposition by bacteria. In effect, lignocellulosic feedstock conversion directly to biogas is a less productive process (Sumardiono et al., 2022). The mean Lig content was lower compared with cattle slurry (9.9 % d.m.), dairy manure (13.58 % d.m.), agricultural biomass (15.08 % d.m.), digestate (15.7 –21.1 % d.m.; the range does not include biogas digestate mix liquid) and wood biomass (27.64 % d.m.) (Brandić et al., 2024; Nielsen et al., 2020; Rehman et al., 2017). However, it was higher than in chicken manure (7.83 % d.m.) and wheat straw (6.3 % d.m.) (Nielsen et al., 2020; Rehman et al., 2017).

The total mean lignocellulose content was 45.96 % d.m. This is not much, given the fact that cellulose, hemicellulose, and lignin usually account for over 80 % of the lignocellulosic material (Mirmohamadsadeghi et al., 2021).

3.5. Extractives

Regarding extractives, the highest cold water extract (CWE) content was found in Santhica 27, Białobrzeskie, Santhica 70 and Earlina 8 fc (mean CWE levels ranged of 21.45 –23.08 % d.m.), included solely in the homogeneous group "a" (Table 10). Finola, with the lowest CWE content of 17.27 % d.m., was included only in "c". The cultivars were separated into two homogeneous groups with respect to the hot water extract (HWE) content. The first group, "a", with the highest HWE levels, lying within the range of 25.19 –26.81 % d.m., which includes Kompolti, Earlina 8 fc, Santhica 27, Santhica 70 and Białobrzeskie. The second, "b", with the lowest levels, including Finola and Henola (20.78

Table 10
CWE, HWE and OSS content of solid hydro-distillation residue depending on the cultivar and flower harvest.

Source of variation	Item	CWE (% d.m.)	HWE (% d.m.)	OSS (% d.m.)
Cultivar	Białobrzeskie	23.08 ± 1.75 a	26.81 ± 1.57 a	30.93 ± 2.06 ab
	Henola	17.95 ± 0.80 bc	21.52 ± 0.53 b	27.81 ± 1.87 bc
	Santhica 27	23.09 ± 1.21 a	26.55 ± 1.39 a	29.83 ± 1.48 ab
	Santhica 70	22.86 ± 1.45 a	26.58 ± 1.41 a	29.24 ± 0.98 abc
	Earlina 8 fc	21.45 ± 1.23 a	25.53 ± 1.74 a	29.73 ± 1.86 ab
	Kompolti	20.79 ± 2.70 ab	25.19 ± 2.41 a	31.78 ± 2.65 a
	Finola	17.27 ± 3.26c	20.78 ± 3.14 b	26.05 ± 2.09c
Flower harvest	with flower harvest	20.27 ± 3.44 b	23.99 ± 3.33 b	29.24 ± 3.04
	without flower harvest	21.59 ± 2.15 a	25.43 ± 2.35 a	29.44 ± 1.94
Mean		20.93 ± 2.91	24.71 ± 2.94	29.34 ± 2.52

[a,b,c] homogenous groups for the main source of variation and their interaction separately for each attribute, no letter denotes an absence of significance; ± – standard deviation

and 21.52 % d.m., respectively). It is noteworthy regarding CWE and HWE that flower harvest proved to be a significant factor in differentiating their content. Among all the 17 qualitative and quantitative characteristics, the flower harvest was a factor with a non-random impact on the sample differentiation only in these two cases. A higher mean content was found in samples without flower harvest – CWE: 21.59 > 20.27 % d.m., HWE: 25.43 > 23.99 % d.m.

The differentiation of other soluble substance content in individual cultivars was the smallest. Only two extreme levels determined for Kompolti and Finola were included solely in one homogeneous group, "a" (31.78 % d.m.) and "c" (26.05 % d.m.), respectively.

In general the residue profile with respect to extractives was as follows: CWE = 20.93 ± 2.91 % d.m.; HWE = 24.71 ± 2.94 % d.m.; and other soluble substances (OSS) = 29.34 ± 2.52 % d.m. (Table 10). The total mean extractive content was 54.05 % d.m. The highest correlations were found for HWE–CWE (0.97); CWE–Hem (-0.91), and HWE–Hem (-0.90) (Table 11). Those were very high correlations, indicative of a very dependable relationship. The weakest statistically significant correlations were found between CWE and Cel (-0.38) and between Hem and Lig (-0.38) (low correlation; definite but small relationship).

Extracts are non-structural biomass components, which are, in general, minerals and secondary metabolites, which makes them rich sources of bioactive substances (Pisanó et al., 2021). The group of extracts includes monosaccharides, pectins, starch, gums, fatty acids, fats, waxes, proteins, sterols, resins, terpenes, phenols and flavonoids. They usually account for approximately 10 % d.m., with their content varying from one species to another (from 2.66 % to 30.47 % d.m.) (Pisanó et al., 2021; Tajmirriahi et al., 2021).

Solid hydro-distillation residue contained very high mean total extractives levels at 54.05 % d.m., which suggests the need for a more detailed composition analysis. So far, regarding solid distillation residues from hemp, only the phytochemical composition of flower extracts has been examined (Luca et al., 2024). In contrast, solid residue from hydro-distillation of green concentrate/bioconcentrate from threshing has not been analyzed. The total CWE content was 20.93 % d.m., and it exceeded the CWE level in birch bark (14.39 % d.m.), birch foliage (17.23 % d.m.), switchgrass (18.26 % d.m.) and poplar bark (18.45 % d.m.) (Pisanó et al., 2021).

Despite their often low content of biomass, extracts can have various impacts on bioconversion processes, which is a consequence of their diverse composition (Tajmirriahi et al., 2021). No clear trends have been observed regarding correlations between extracts and the heating value, although it has been pointed out that organic extracts increase HHV (Demirbas, n.d.; Domingos et al., 2020; Pisanó et al., 2021). On the other hand, their content has a considerable impact on biogas production, increasing or decreasing its output (e.g., some compounds can inhibit anaerobic decomposition) (Tajmirriahi et al., 2021). Since some extracts can hinder the bioconversion process, the preparation of feedstock containing high levels of "disadvantageous" extracts should also involve isolation. Such isolated extracts may be highly useful in other branches of industry (Pisanó et al., 2021).

Removing flowers leads to lower extractive content (Table 10) because the hemp panicle located at the top of the shoot is rich in biologically active compounds (Dudziec et al., 2024). This could potentially reduce the HHV of residues or potentially influence microbial activity within biogas production (Demirbas, n.d.; Domingos et al., 2020; Pisanó et al., 2021, Tajmirriahi et al., 2021).

Table 11
Simple correlation coefficient between the analysed attributes.

Item	HWE	OSS	Cel	Hem	Lig
CWE	0.97*	0.61*	−0.38*	−0.91*	0.27
HWE		0.59*	−0.41*	−0.90*	0.27
OSS			−0.64*	−0.71*	0.08
Cel				0.25	−0.22
Hem					−0.38*

*significant values ($p < 0.05$)

3.6. General characteristics of industrial hemp solid hydro-distillation residue

Table 12 presents descriptive statistics for the whole set of data for all the types of industrial hemp solid hydro-distillation residue. The lowest differentiation, expressed as the coefficient of variation under 10 %, was found for: moisture content, volatile matter, fixed carbon, higher heating value, lower heating value, carbon, hydrogen, nitrogen and other soluble substances. The highest coefficient of variation (>20 %) was calculated for: ash (21.89 %), hemicellulose (22.83 %), chlorine (27.39 %) and sulfur (30.54 %).

Fig. 1 shows a dendrogram of similarities between the cultivars with respect to their parameters as biofeedstock. Residues were classified only into two different clusters at the cut-off point of 0.66 D_{max}. The first cluster included only Finola, and the second included the other six cultivars. However, only three (Białobrzeskie, Santhica 27 and Santhica 70) were classified into one common cluster at the cut-off point of 0.33 D_{max}. Residues from these cultivars were the most similar to one another with respect to quality at this cut-off level. Each of the other four cultivars constituted a separate cluster at this cut-off point. Finola differs clearly from the other residues, which is reflected in the result analysis because it dominated with respect to the extreme levels of individual parameters. The presence of Białobrzeskie, Santhica 27 and Santhica 70 residues at the cut-off point of 0.33 D_{max} is not surprising if one considers the characteristics of these cultivars. These are monoecious cultivars with similar biometry, phenology and intended purpose. The second cluster comprised residues from Henola and Earlina 8 fc (a cut-off at the bond distance of approximately 0.4 D_{max}) – cultivars of a similar profile (monoecious, intended use: flowers and seeds, differ by their biometry and phenology, but to a small extent). However, one may wonder about the similarity of residue from Kompolti (dioecious cultivar, intended for biomass and fiber, clearly different from the others) to the cluster comprising Henola-Earlina 8 fc. What is also interesting is the lack of similarity of the Finola to the group including Henola–Earlina 8 fc (Finola cultivar is also intended for flowers and seeds).

Several studies have been conducted to examine the composition of solid distillation residues. A study by Nigam et al. (2018) focused on

Table 12
Selected statistical analysis indicators for the studied features (*N Valid* = 60).

Feature	Mean	Median	Minimum Value	Maximum Value	LowerQuartile	UpperQuartile	StandardDeviation	Coefficient of Variation (%)
M (%)	87.27	87.36	82.60	88.76	87.07	87.96	1.10	1.26
VM (% d.m.)	64.83	66.08	51.14	68.57	62.73	67.61	3.75	5.79
FC (% d.m.)	14.02	14.04	11.87	16.73	13.42	14.53	1.18	8.40
A (% d.m.)	21.15	19.81	14.75	36.92	17.68	23.76	4.63	21.89
HHV (MJ kg^{-1} d.m.)	15.92	16.04	13.11	17.19	15.23	16.65	0.89	5.60
LHV (MJ kg^{-1})	12.48	12.54	10.26	13.53	11.93	13.09	0.72	5.77
C (% d.m.)	36.99	37.36	28.40	43.33	35.19	39.34	3.24	8.75
H (% d.m.)	4.05	4.11	3.11	4.64	3.84	4.27	0.37	9.12
S (% d.m.)	0.126	0.127	0.068	0.209	0.091	0.151	0.038	30.54
N (% d.m.)	3.17	3.23	2.68	3.54	3.04	3.34	0.23	7.15
Cl (% d.m.)	0.126	0.127	0.045	0.225	0.110	0.142	0.034	27.39
CWE (% d.m.)	20.93	21.67	11.33	25.48	18.72	22.83	2.91	13.90
HWE (% d.m.)	24.71	25.40	15.39	28.82	22.65	26.89	2.94	11.89
OSS (% d.m.)	29.34	29.36	23.31	34.45	27.57	30.84	2.52	8.60
Cel (% d.m.)	18.88	19.30	14.73	21.91	17.37	20.75	1.97	10.45
Hem (% d.m.)	19.11	17.69	14.12	32.43	15.70	21.81	4.36	22.83
Lig (% d.m.)	7.96	8.22	5.79	10.05	7.25	8.70	1.10	13.88

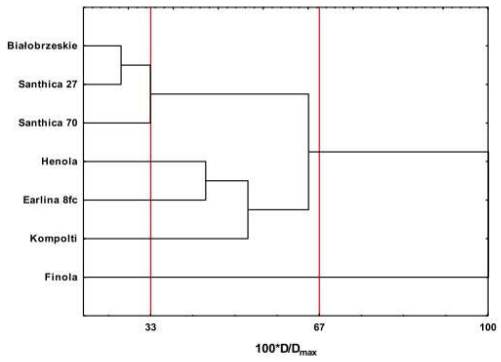


Fig. 1. Dendrogram of hierarchical cluster analysis presenting mutual similarities of solid hydro-distillation residues. The vertical red line represents the Sneath criterion – 0.66 D_{max} and 0.33 D_{max}. D – linage distance; D_{max} – maximum linage distance.

distilled waste of *Mentha arvensis* collected from the citronella oil industry. Singh et al. (2013) analyzed *Pogostemon cablin* residue from a commercial distillation process (carried out for 6–8 h at high steam pressure), and Tavares et al. (2020) studied residue after obtaining EO from aerial parts of *Cupressus lusitanica*. The profiles of solid residues after EO extraction from selected aromatic herbs have been presented in greater detail (Pulidori et al., 2023). Unfortunately, most studies (with the exception of Singh et al. 2013) did not specify the process of obtaining EO and, as a consequence, the process by which solid distillation residue was generated. Moreover, the scope of the analyses performed in these studies to show the properties of solid distillation residue was narrower compared with the scope of analyses of the present study. Nevertheless, the results were compared. Therefore, industrial hemp contained the highest mean level of A, and the VM and FC content was similar to those of *M. arvensis* (Table 13). The mean C content was also close to *M. arvensis*. For the N content, it was the highest in hemp residue, whereas the H level was the lowest. The mean S content lay within the range of the parameter for the other distillation residues. The HHV, in turn, was the lowest. The mean Cel content was the lowest, Hem lay within the range of the mean component levels in other distillation residues, and the Lig was the lowest, except in *C. lusitanica* residue (merely 2.5 % d.m.). Comparison of the results posed some problems (apart from the aspect mentioned earlier) because of the novelty of this study since industrial hemp, which is not yet utilized widely in this process, was used in EO distillation. Essential oils are usually obtained

Table 13
The properties other solid distillation residues (mean values).

Feature	*Rosmarinus* sp.(Pulidori et al. 2023)	*Lavandula* sp.(Pulidori et al. 2023)	*Thymus* sp.(Pulidori et al. 2023)	*Artemisia vulgaris*(Pulidori et al. 2023)	*Ruta chalepensis*(Pulidori et al. 2023)	*Cupressus lusitanica* (Tavares et al. 2020)	*Mentha arvensis*	*Pogostemon cablin*(Singh et al. 2013)
Ash (% d.m.)	3.0	6.3	4.6	5.8	6.7	5.7	17.6	-
VM (% d.m.)	-	-	-	-	-	-	65.8	-
FC (% d.m.)	-	-	-	-	-	-	16.7	-
C (% d.m.)	51.66	45.4	42.55	44.7	42.8	-	36.1	39.2
H (% d.m.)	6.9	6.77	6.66	6.90	6.71	-	6.8	-
N (% d.m.)	1.19	1.79	1.66	2.4	1.84	-	1.5	1.90
S (% d.m.)	0.09	0.112	0.15	0.20	0.15	-	-	-
HHV (MJ kg^{-1} d.m.)	22.0	19.2	17.8	19.3	18.0	-	-	-
Cel (% d.m.)	32	41	37	43	35	-	36.18	54.5
Hem (% d.m.)	25	23	23	21	24	17.7	15.46	24.1
Lig (% d.m.)	26	16	24	17	22	2.5	16.7	18.3

from fresh herbal feedstock, such as flowers. The current study involved hydro-distillation of the fraction obtained by the separation of stalks, followed by the separation of nuts (the fraction obtained at the stage of at least seed maturity, i.e., at the phenological phase close to senescence). The fraction comprised leaves, flowers (with green and brown calyces forming the nut cover and green calyces with unripe nuts), empty nuts and seeds and small twigs constituting the axes of inflorescences. This was probably the second cause of some results outlying compared with other types of solid distillation residue.

3.7. Selecting potential conversion process and potential pre-treatment strategies

Biomass with moisture content under 50 % is used effectively for combustion, but with moisture content of 5–20 % is usually used as fuel. The moisture content of wood used in small heating systems (e.g., in private houses) should not exceed 25 %. If it is higher, the combustion temperature will decrease below the optimum range, leading to increased heat loss, intensified emissions, and possible chimney damage (Stolarski et al., 2022). High ash content can reduce combustion efficiency and exacerbate corrosion issues, making biomass with low ash content highly desirable (Racero-Galaraga et al., 2024). Ash content in biomass above 10 % is already high (Stella Mary et al., 2016). Biomass with high ash content also causes erosion and slag deposition in the pyrolysis reactor, therefore it is not suitable for use in the pyrolysis process. Furthermore, biomass with lower moisture (below 11 %) is the most suitable raw material for biochar production (Sahoo et al., 2021).

The industrial hemp solid hydro-distillation residue had high mean ash content of 21.15 ± 4.63 % d.m. with mean moisture of 87.27 ± 1.10 % (Table 2), which does not predispose it to direct and/or untreated use as biofeedstock for combustion and biochar production.

In the field of biochemical processes composting is typically used to enrich soil from nutrient-rich organic wastes (Wang and Tester, 2023). The most favorable moisture content for biodegradation of different compost mixtures ranges from 50 % to 70 %. Proper composting can also be expected when C/N ratios are lower than 25 (Li et al., 2013). For biogas production, the biomass should also have high nutritional value, leading to increased biogas yield (e.g., optimal C/N ratio = 25:1; higher C/N ratios are associated with lower methane concentrations).

The mean C/N ratio (Table 4 analysis) in the analyzed residue was approximately 12, which is low. Although the moisture content of the residue exceeded optimal levels for composting, it matched the typical range for raw materials used in biogas plants (Kasinath et al., 2021). The mean ash content was within the range of ash content of waste intended for composting and biogas production (Rahman et al., 2020; Steffen et al., 2016). However, the use of compost also requires knowledge of the mineralogical composition of the ash. The main ash-forming constituents include elements such as Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe, Mn, as well as heavy metals – Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V or Hg (Racero-Galaraga et al., 2024). The point is to prevent the content of heavy metals in the soil from increasing above the normative levels. Moreover, composition and content of elements affect microbial activity (Kasinath et al., 2021).

The characteristics of the solid hydro-distillation residue do not currently allow for the identification of the most suitable potential conversion process. The chemical profile of the residue suggests that it should undergo pre-treatment aimed at reducing moisture content, improving the C/N ratio, and reducing ash content. This may involve dewatering (e.g., mechanical), drying (e.g., with hot air), and blending with other types of biomass in an appropriately selected mass ratio.

Nevertheless, even in its current form, the biomass could be used for co-combustion, co-pyrolysis, co-composting, or co-digestion. Particularly interesting, due to the considerable ash content, is the potential use of the solid hydro-distillation residue as a mineral additive to compost mixtures (which may improve the structure and mineral composition of the final compost) or as a component of feedstock for biogas plants (for pH buffering and potential enhancement of microbial activity). However, this clearly requires further research, especially regarding the composition of the ash.

Moreover, the high extractive content (54.05 % of dry matter, see subsection 3.5.) raises the question of whether it would be advisable to extract biologically active compounds from the biomass prior to thermochemical or biochemical conversion. Therefore, investigating the extractives composition of the solid hydro-distillation residue is an important area for further research. This is particularly important because extractives may also contain chemical compounds that inhibit the fermentation/composting process, e.g. different phenolic compounds show varying degrees of inhibition of biogas production (Tajmiriahi et al., 2021). On the other hand, high content of extracts may increase HHV relevant for combustion (Demirbas, n.d.; Domingos et al., 2020; Pisanó et al., 2021). The high extractives content therefore represents both an opportunity and a challenge for bioenergy applications, highlighting the need to find an appropriate balance between valorization and process efficiency.

It is also important to emphasize logistical constraints. While combustion and composting are widely accessible, technologies such as pyrolysis and biogas production are still limited in terms of general availability.

4. Conclusions

This study provides the first comprehensive chemical and energy-relevant profile of solid hydro-distillation residue from industrial hemp, covering seven cultivars. The analysis revealed that the residue is characterized by high moisture content and elevated ash levels, which currently limit its direct use in combustion or biochar production. However, the relatively high volatile matter, moderate fixed carbon, and high total extractives content suggest potential for valorization through biochemical conversion processes, such as anaerobic digestion, especially when co-digested with other substrates. The low C/N ratio and high nitrogen content further support its suitability as a supplement in biogas production, where it may potentially enhance microbial activity and buffering capacity.

Significant differences among cultivars was observed for most parameters, indicating that selection of hemp genotype could be optimized depending on the intended conversion pathway. Notably, the Finola cultivar exhibited a distinctly different residue profile, which may have implications for targeted application.

It should be stressed that this study used solid residue after hydro-distillation of industrial hemp threshing residue, which could be a reason for the differences when compared with solid distillation residues from other species. This is because fresh herbal feedstock, e.g., flowers, is usually used for distillation. Therefore, there is an intriguing difference between hemp solid residues from hydro-distillation of threshing residues and hemp solid residues from hydro-distillation of inflorescences. It would also be worth examining the profiles of both input hydro-distillation feedstocks and determining how hydro-distillation itself affects the feedstock parameters (solid material before hydro-distillation vs. solid material after hydro-distillation).

This profiling fills a critical knowledge gap in the characterization of post-hydro-distillation hemp biomass, which has previously been overlooked in favor of essential oil yield. By delivering detailed compositional data, the study supports improved decision-making for biomass valorization. Furthermore, promotes more efficient integration of hemp residues into renewable energy systems, and informs future policy aimed at supporting circular bioeconomy strategies and sustainable waste management in the aromatic plant sector.

It is hoped that this study will be used by other scientists in their research of solid distillation residues and even more so in studies examining the actual use of such residues, e.g., as feedstock for fermentation/biogas plant, composting or in processes of thermal (including combustion) or thermochemical conversion. The findings of

such studies could provide more added value regarding industrial hemp as a multi-purpose crop and other MAPs. Moreover, it could contribute to eliminating the concept of the end of a product's life, which will result in more efficient switching to the circular economy.

CRediT authorship contribution statement

Stolarski Mariusz Jerzy: Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Funding acquisition, Formal analysis. **Kazimierz Warmiński:** Writing – review & editing, Validation, Funding acquisition, Formal analysis. **Paweł Dudziec:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This research results from a study carried out at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, grant No. 30.610.007–110 and Department of Chemistry, grant No. 30.610.002–110. The project is funded by the Minister of Science under the "Regional Initiative of Excellence Program", RID/SP/0025/2024/01.

Data availability

Data will be made available on request.

References

Abu Bakar, M.S., Ahmed, A., Jeffery, D.M., Hidayat, S., Sukri, R.S., Mahlia, T.M.I., Jamil, F., Khurrum, M.S., Inayat, A., Moogi, S., Park, Y.K., 2020. Pyrolysis of solid waste residues from lemon myrtle essential oils extraction for bio-oil production. Bioresour. Technol. 318. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123913.

Adeleke, A.A., Odusote, J.K., Ikubanni, P.P., Lasode, O.A., Malathi, M., Paswan, D., 2021. Essential basics on biomass torrefaction, densification and utilization. Int J. Energy Res. https://doi.org/10.1002/er.5884.

Akgül, G., Madenoğlu, T.G., Cengiz, N.Ü., Sağlam, M., Yüksel, M., 2014. Hydrothermal gasification of rosa damascena residues: gaseous and aqueous yields. J. Supercrit. Fluids 85, 135–142. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.007.

Alavi-Borazjani, S.A., Capela, I., Tarelho, L.A.C., 2020. Valorization of biomass ash in biogas technology: opportunities and challenges. Energy Rep. 472–476. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.010.

Alexandri, M., Christaki, S., Gkatzionis, K., Mourtzinos, I., Tsouko, E., 2023. Residual biomass from major aromatic and medicinal flora of the Mediterranean: challenges towards sustainable integration into food systems within the circular bioeconomy. Trends Food Sci. Technol. 139, 104123. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104123.

Allende, S., Brodie, G., Jacob, M.V., 2023. Breakdown of biomass for energy applications using microwave pyrolysis: a technological review. Environ. Res. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115619.

Alves-Ferreira, J., Lourenço, A., Morgado, F., Duarte, L.C., Roseiro, L.B., Fernandes, M.C., Pereira, H., Carvalheiro, F., 2021. Delignification of cistus ladanifer biomass by organosolv and alkali processes. Energies 14. https://doi.org/10.3390/en14041127.

Apurva, Wasnik, K., Kumar, D., Pandey, M., Deepak Nannaware, A., Kumar Verma, R., 2024. On-farm energy input-output and economic analysis of important essential oil-bearing mint species in subtropical India. Energy Convers. Manag. X 23. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100617.

Azeta, O., Ayeni, A.O., Agboola, O., Elehinafe, F.B., 2021. A review on the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass. Sci. Afr. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909.

Baranauskienė, R., Venskutonis, P.R., Ragažinskienė, O., 2022. Valorisation of roman chamomile (*chamaemelum nobile* L.) herb by comprehensive evaluation of hydrodistilled aroma and residual non-volatile fractions. Food Res. Int. 160, 111715. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111715.

Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., Iyyappan, J., 2018. Biogas production – a review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renew. Sustain. Energy Rev. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093.

Bhiri, F., Kallel, F., Bouallegue, A., Abidi, S., Bensidhom, G., Ellouz Chaabouni, S., Trabelsi, A.B.H., 2024. Hydro-distilled wastes from rosa canina: a new renewable bioresource for the extraction and characterization of cellulosic microfibers. Eur. J. Environ. Integr. 9, 1751–1763. https://doi.org/10.1007/s41207-024-00529-9.

Bosch, D., Back, J.O., Gurtner, D., Giberti, S., Hofmann, A., Bockreis, A., 2022. Alternative feedstock for the production of activated carbon with ZnCl2: forestry residue biomass and waste wood. Carbon Resour. Convers. 5, 299–309. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.09.001.

Brandić, I., Voća, N., Gunjača, J., Lončar, B., Bilandžija, N., Peter, A., Šurić, J., Pezo, L., 2024. Biomass higher heating value prediction machine learning insights into ultimate, proximate, and structural analysis datasets. Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff. 46, 2842–2854. https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2309303.

Cavalaglio, G., Cotana, F., Nicolini, A., Coccia, V., Petrozzi, A., Formica, A., Bertini, A., 2020. Characterization of various biomass feedstock suitable for small-scale energy plants as preliminary activity of biocheaper project. Sustain. (Switz.) 12. https://doi.org/10.3390/su12166678.

Chakravarty, I., Parmar, V.M., Mandavgane, S.A., 2023. Current trends in essential oil (EO) production. Biomass.. Convers. Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01963-3.

Chaowana, P., Hnoocham, W., Chaiprapat, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Chaisan, T., Paopun, Y., Pisutpiched, S., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., 2024. Utilization of hemp stalk as a potential resource for bioenergy. Mater. Sci. Energy Technol. 7, 19–28. https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.07.001.

Chiang, K.Y., Chien, K.L., Lu, C.H., 2012. Characterization and comparison of biomass produced from various sources: suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. Appl. Energy 100, 164–171. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.063.

Christaki, S., Bouloumpasi, E., Lalidou, E., Chatzopoulou, P., Irakli, M., 2022. Bioactive profile of distilled solid by-products of rosemary, Greek sage and spearmint as affected by distillation methods. Molecules 27. https://doi.org/10.3390/molecules27249058.

Czekała, W., Nowak, M., Bojarski, W., 2023. Characteristics of substrates used for biogas production in terms of water content. Fermentation. https://doi.org/10.3390/fermentation9050449.

Deshmukh, Y., Yadav, V., Nigam, N., Yadav, A., Khare, P., 2015. Quality of bio-oil by pyrolysis of distilled spent of *cymbopogon flexuosus*. J. Anal. Appl. Pyrolysis 115, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.07.003.

Domingos, I., Ayata, U., Ferreira, J., Cruz-Lopes, L., Sen, A., Sahin, S., Esteves, B., 2020. Calorific power improvement of wood by heat treatment and its relation to chemical composition. Energies 13. https://doi.org/10.3390/en13205322.

Dudziec, P., Stachowicz, P., Stolarski, M.J., 2023. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. Renew. Energy 202, 822–833. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.002.

Dudziec, P., Warmiński, K., Stolarski, M.J., 2024. Industrial hemp as a multi-purpose crop: last achievements and research in 2018−2023. J. Nat. Fibers. https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2369186.

Dvaranauskaite, A., Venskutonis, P.R., Raynaud, C., Talou, T., Viškelis, P., Dambrauskiene, E., 2008. Characterization of steam volatiles in the essential oil of black currant buds and the antioxidant properties of different bud extracts. J. Agric. Food Chem. 56, 3279–3286. https://doi.org/10.1021/jf7037168.

de Elguea-Culebras, G.O., Bravo, E.M., Sánchez-Vioque, R., 2022. Potential sources and methodologies for the recovery of phenolic compounds from distillation residues of Mediterranean aromatic plants. An approach to the valuation of by-products of the essential oil market – a review. Ind. Crops Prod. 175, 114261. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114261.

Esteves, B., Sen, U., Pereira, H., 2023. Influence of chemical composition on heating value of biomass: a review and bibliometric analysis. Energies. https://doi.org/10.3390/en16104226.

Fereidani, B.M., Üçtuğ, F.G., 2023. Life cycle assessment of rose oil and rose water production: a case study in Iran. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20, 3831–3848. https://doi.org/10.1007/s13762-023-04821-z.

Fidan, H., Stankov, S., Petkova, N., Bozadziev, B., Dimov, M., Lazarov, L., Simitchiev, A., Stoyanova, A., 2021. Bio-energy characteristics of black pine (Pinus nigra Arn.) hydrodistillation waste products. J. Energy Syst. https://doi.org/10.30521/jes.962474.

Fike, J.H., Darby, H., Johnson, B.L., Smart, L., Williams, D.W., 2020. Industrial hemp in the USA: a brief synopsis. In: Crini, G., Lichtfouse, E. (Eds.), Sustainable Agriculture Reviews 42: Hemp production and applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 89–109. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41384-2_3.

Gajera, B., Tyagi, U., Sarma, A.K., Jha, M.K., 2023. Pyrolysis of cattle manure: kinetics and thermodynamic analysis using TGA and artificial neural network. Biomass.. Convers. Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04476-3.

Gani, A., Erdiwansyah, Desvita, H., Munawar, E., Mamat, R., Nizar, M., Darnas, Y., Sarjono, R.E., 2024. Comparative analysis of HHV and LHV values of biocoke fuel from palm oil mill solid waste. Case Stud. Chem. Environ. Eng. 9. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100581.

Gehrmann, H.J., Mätzing, H., Nowak, P., Baris, D., Seifert, H., Dupont, C., Defoort, F., Peyrot, M., Castagno, F., 2020. Waste wood characterization and combustion behaviour in pilot lab scale. J. Energy Inst. https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.02.001.

Ghiasi, M.M., Mohammadzadeh, O., Zendehboudi, S., Fgaier, H., 2024. Effective approach to assess higher heating value of biomass from ultimate and proximate analysis. Can. J. Chem. Eng. https://doi.org/10.1002/cjce.25287.

Ghodake, G.S., Shinde, S.K., Kadam, A.A., Saratale, R.G., Saratale, G.D., Kumar, M., Palem, R.R., AL-Shwaiman, H.A., Elgorban, A.M., Syed, A., Kim, D.Y., 2021. Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. J. Clean. Prod. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645.

Güleç, F., Pekaslan, D., Williams, O., Lester, E., 2022. Predictability of higher heating value of biomass feedstocks via proximate and ultimate analyses – a comprehensive study of artificial neural network applications. Fuel 320. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123944.

Hassouni, A.El, Bachiri, A.El, Belbachir, C., 2019. Lavandula dentata solid residue from essential oil industry. J. Essent. OilBear. Plants 22, 1601–1613. https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1709906.

Heinz, A., Kaltschmitt, M., St Ulpnagel, R., Scheeer, K., 2001. Comparison of moist vs. Air-dry biomass provision chains for energy generation from annual crops. Biomass.. Bioenergy.

de Holanda Pasolini, V., Lima, R.M., Costa, A.B.S., de Sousa, R.C., 2024. Drying of poultry manure for biomass applications in the combustion. Biomass.. Convers. Biorefin 14, 17543–17553. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04001-6.

Irakli, M., Skendi, A., Bouloumpasi, E., Chatzopoulou, P., Biliaderis, C.G., 2021. Lc-ms identification and quantification of phenolic compounds in solid residues from the essential oil industry. Antioxidants 10. https://doi.org/10.3390/antiox10122016.

Irakli, M., Skendi, A., Bouloumpasi, E., Christaki, S., Biliaderis, C.G., Chatzopoulou, P., 2023. Sustainable recovery of phenolic compounds from distilled rosemary by-product using Green extraction methods: optimization, comparison, and antioxidant activity. Molecules 28. https://doi.org/10.3390/molecules28186669.

Jasinskas, A., Šiaudinis, G., Karčauskienė, D., Bielska, R.M., Marks, M., Bielski, S., Mieldažys, R., Romaneckas, K., Šarauskis, E., 2024. Evaluation of the productivity and potential utilization of artemisia dubia plant biomass for energy conversion. Plants 13. https://doi.org/10.3390/plants13081158.

Kasinath, A., Bharathiraja, B., Jambulingam, R., Iyyappan, J., Al-Muhtaseb, A.H., 2021. Techno-economic assessment of a hybrid biorefinery platform for the production of xylo-oligosaccharides and bioethanol from rice straw. Fuel 287, 119481. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119481.

Kaur, N., Ahmed, T., 2021. Bioactive secondary metabolites of medicinal and aromatic plants and their disease-fighting properties. In: Aftab, T., Hakeem, K.R. (Eds.), Medicinal and aromatic plants: healthcare and industrial applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 113–142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58975-2_4.

Kazimierski, P., Januszewicz, K., Godlewski, W., Fijuk, A., Suchocki, T., Chaja, P., Barczak, B., Kardaś, D., 2022. The course and the effects of agricultural biomass pyrolysis in the production of high-calorific biochar. Materials 15. https://doi.org/10.3390/ma15031038.

Kebede, T., Berhe, D.T., Zergaw, Y., 2022. Combustion characteristics of briquette fuel produced from biomass residues and binding materials. J. Energy 2022, 1–10. https://doi.org/10.1155/2022/4222205.

Król, D., Motyl, P., Poskrobko, S., 2022. Chlorine corrosion in a low-power boiler fired with agricultural biomass. Energies 15. https://doi.org/10.3390/en15010382.

Kumar, I., Kumar, U., Singh, P.K., Singh, R.P., Madheshiya, P., Kharwar, S., 2024. Utilizing residual biomass from medicinal and aromatic plants: scope for value enhancement. In: Kumar, L., Bharadvaja, N., Singh, R., Anand, R. (Eds.), Medicinal and aromatic plants: current research status, value-addition to their waste, and agro-industrial potential (Vol II). Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 185–202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64601-0_13.

Kwanga, S.N., Djuffo, D.T., Boum, A.T., Anoh, F.A., Dongmo, P.M.J., 2022. Effect of solid-state fermentation on the essential oil yield of curcuma longa residues. Waste Biomass.. Valoriz. 13, 4565–4573. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01817-7.

Lesage-Meessen, L., Bou, M., Sigoillot, J.C., Faulds, C.B., Lomascolo, A., 2015. Essential oils and distilled straws of lavender and lavandin: a review of current use and potential application in White biotechnology. Appl. Microbiol Biotechnol. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6511-7.

Li, Z., Lu, H., Ren, L., He, L., 2013. Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review. Chemosphere 93, 1247–1257. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.064.

Lisý, M., Lisá, H., Jecha, D., Baláš, M., Križan, P., 2020. Characteristic properties of alternative biomass fuels. Energies 13. https://doi.org/10.3390/en13061448.

Luca, S.V., Wojtanowski, K., Korona-Glowniak, I., Skalicka-Woźniak, K., Minceva, M., Trifan, A., 2024. Spent material extractives from hemp hydrodistillation as an underexplored source of antimicrobial cannabinoids. Antibiotics 13. https://doi.org/10.3390/antibiotics13060485.

Ma, C., Song, K., Yu, J., Yang, L., Zhao, C., Wang, W., Zu, G., Zu, Y., 2013. Pyrolysis process and antioxidant activity of pyroligneous acid from rosmarinus officinalis leaves. J. Anal. Appl. Pyrolysis 104, 38–47. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.09.011.

Madhu, P., Sowmya Dhanalakshmi, C., Mathew, M., 2020. Multi-criteria decision-making in the selection of a suitable biomass material for maximum bio-oil yield during pyrolysis. Fuel 277. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118109.

Mahmoudi, H., Marzouki, M., M'Rabet, Y., Mezni, M., Ait Ouazzou, A., Hosni, K., 2020. Enzyme pretreatment improves the recovery of bioactive phytochemicals from sweet basil (Ocimum basilicum L.) leaves and their hydrodistilled residue by-products, and potentiates their biological activities. Arab. J. Chem. 13, 6451–6460. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.003.

Maj, I., Kalisz, S., Szymajda, A., Łaska, G., Gołombek, K., 2021. The influence of cow dung and mixed straw ashes on steel corrosion. Renew. Energy 177, 1198–1211. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.019.

Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A.C., Sousa, A.M.O., 2019. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the european industry. Renew. Sustain. Energy Rev. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022.

Mancini, M., Toscano, G., Feliciangeli, G., Leoni, E., Duca, D., 2020. Investigation on woodchip quality with respect to ISO standards and relationship among quality parameters. Fuel 279. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118559.

Marcelino, S., Gaspar, P.D., Paço, A., 2023. Sustainable waste management in the production of medicinal and aromatic plants—a systematic review. Sustain. (Switz.). https://doi.org/10.3390/su151813333.

Mari Selvam, S., Balasubramanian, P., 2023. Influence of biomass composition and microwave pyrolysis conditions on biochar yield and its properties: a machine learning approach. Bioenergy Res. 16, 138–150. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10447-9.

Marin-Batista, J.D., Villamil, J.A., Qaramaleki, S.V., Coronella, C.J., Mohedano, A.F., Rubia, M.A. de la, 2020. Energy valorization of cow manure by hydrothermal carbonization and anaerobic digestion. Renew. Energy 160, 623–632. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.003.

Mayton, H., Amirkhani, M., Loos, M., Johnson, B., Fike, J., Johnson, C., Myers, K., Starr, J., Bergstrom, G.C., Taylor, A., 2022. Evaluation of industrial hemp seed treatments for management of damping-off for enhanced stand establishment. Agriculture 12. https://doi.org/10.3390/agriculture12050591.

Miljanović, A., Dent, M., Grbin, D., Pedisić, S., Zorić, Z., Marijanović, Z., Jerković, I., Bielen, A., 2023. Sage, rosemary, and bay laurel hydrodistillation by-products as a source of bioactive compounds. Plants 12. https://doi.org/10.3390/plants12232394.

Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Azarbaijani, R., Parsa Yeganeh, L., Angelidaki, I., Nizami, A.S., Bhat, R., Dashora, K., Vijay, V.K., Aghbashlo, M., Gupta, V.K., Tabatabaei, M., 2021. Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: a review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity. Renew. Sustain. Energy Rev. 135. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110173.

Mrosso, R., Mecha, A.C., Kiplagat, J., 2023. Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: effect of parameters. Heliyon 9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16360.

Munawar, M.A., Khoja, A.H., Naqvi, S.R., Mehran, M.T., Hassan, M., Liaquat, R., Dawood, U.F., 2021. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. Renew. Sustain. Energy Rev. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111451.

Navarrete, A., Herrero, M., Martín, A., Cocero, M.J., Ibáñez, E., 2011. Valorization of solid wastes from essential oil industry. J. Food Eng. 104, 196–201. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.033.

Nielsen, K., Roß, C.L., Hoffmann, M., Muskolus, A., Ellmer, F., Kautz, T., 2020. The chemical composition of biogas digestates determines their effect on soil microbial activity. Agric. (Switz.) 10. https://doi.org/10.3390/agriculture10060244.

Nigam, N., Shanker, K., Khare, P., 2018. Valorisation of residue of mentha arvensis by pyrolysis: evaluation of agronomic and environmental benefits. Waste Biomass.. Valoriz. 9, 1909–1919. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9928-7.

Nivash, V., Sakthivadivel, D., 2024. Characterization and thermo-chemical conversion of invasive biomass by varying gasifying agents for hydrogen rich producer gas using ASPEN plus. Biomass.. Convers. Biorefin 14, 15969–15987. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03654-z.

Nouska, C., Irakli, M., Georgiou, M., Lytou, A.E., Skendi, A., Bouloumpasi, E., Chatzopoulou, P., Biliaderis, C.G., Lazaridou, A., 2023. Physicochemical characteristics, antioxidant properties, aroma profile, and sensory qualities of value-added wheat breads fortified with post-distillation solid wastes of aromatic plants. Foods 12. https://doi.org/10.3390/foods12214007.

Ogwang, I., Kasedde, H., Nabuuma, B., Kirabira, J.B., Lwanyaga, J.D., 2021. Characterization of biogas digestate for solid biofuel production in Uganda. Sci. Afr. 12. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00735.

ÖzyuğUran, A., Yaman, S., 2017. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. Energy Procedia 130–136. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149.

Pisanó, I., Gottumukkala, L., Hayes, D.J., Leahy, J.J., 2021. Characterisation of Italian and Dutch forestry and agricultural residues for the applicability in the bio-based sector. Ind. Crops Prod. 171. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113857.

Psarrou, I., Oreopoulou, A., Tsimogiannis, D., Oreopoulou, V., 2020. Extraction kinetics of phenolic antioxidants from the hydro distillation residues of rosemary and effect of pretreatment and extraction parameters. Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25194520.

Pulidori, E., Gonzalez-Rivera, J., Pelosi, C., Ferrari, C., Bernazzani, L., Bramanti, E., Tiné, M.R., Duce, C., 2023. Thermochemical evaluation of different waste biomasses (citrus peels, aromatic herbs, and poultry feathers) towards their use for energy production. Thermo 3, 66–75. https://doi.org/10.3390/thermo3010004.

Puri, L., Hu, Y., Naterer, G., 2024. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. Front. Fuels 2. https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361.

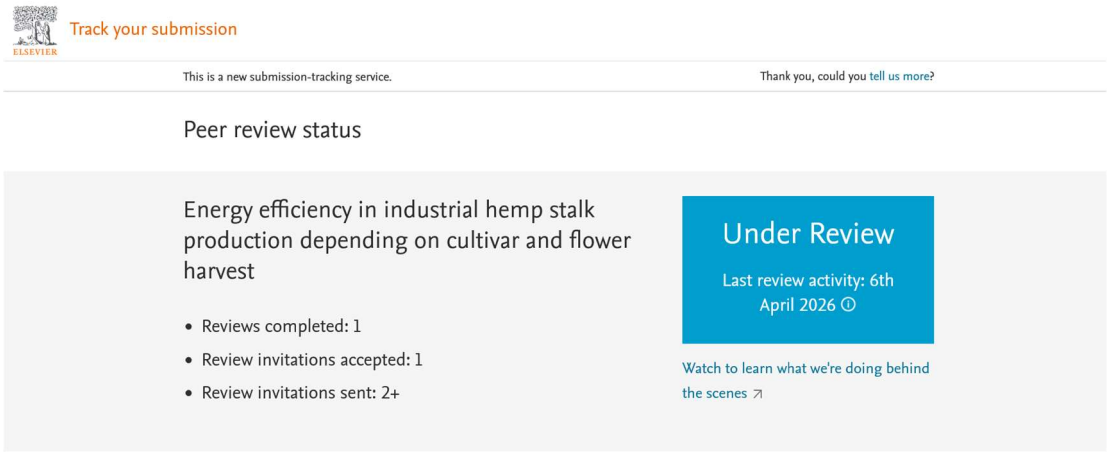
Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J.D., Sofan-German, S., Mendoza, J.M., Bula-Silvera, A., 2024. Proximate analysis in biomass: standards, applications and key characteristics. Results Chem. 12, 101886. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886.

Rafya, M., Zehhar, N., Hafidi, A., Benkhalti, F., 2024a. Review of rosmarinus officinalis L. Essential oil, hydrosol, and residues analysis: composition, bioactivities, and valorization. Ind. Crops Prod. 221, 119392. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119392.

Rafya, M., Zehhar, N., Hafidi, A., Benkhalti, F., 2024b. Chemical profiling and biological activity assessment of volatile and non-volatile compounds in rosmarinus officinalis

residues. J. Biol. Act. Prod. Nat. 14, 80–97. https://doi.org/10.1080/22311866.2024.2312818.
Rahman, M.H.A., Sadi, T., Ahmad, A.A., Masri, I.N., Yusoff, M.M., Kamaruddin, H., Shakri, N.A., Hamid, M.A.A., Malek, R.A., 2020. Inventory and composting of yard waste in serdang, selangor, Malaysia. Heliyon 6, e04486. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04486.
Ratri, P.J., Ayurini, M., Khumaini, K., Rohbiya, A., 2020. Clove oil extraction by steam distillation and utilization of clove buds waste as potential candidate for eco-friendly packaging. J. Bahan Alam Terbarukan 9, 47–54. https://doi.org/10.15294/jbat.v9i1.24935.
Rehman, K. ur, Cai, M., Xiao, X., Zheng, L., Wang, H., Soomro, A.A., Zhou, Y., Li, W., Yu, Z., Zhang, J., 2017. Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (Hermetia illucens L.). J. Environ. Manag. 196, 458–465. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.047.
Robertson, K.J., Brar, R., Randhawa, P., Stark, C., Baroutian, S., 2023. Opportunities and challenges in waste management within the medicinal cannabis sector. Ind. Crops Prod. 197, 116639. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116639.
Saha, A., Basak, B.B., 2020. Scope of value addition and utilization of residual biomass from medicinal and aromatic plants. Ind. Crops Prod. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111979.
Sahoo, S.S., Vijay, V.K., Chandra, R., Kumar, H., 2021. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. Clean. Eng. Technol. 3, 100101. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101.
Saleh, S.B., Flensborg, J.P., Shoulaifar, T.K., Sárossy, Z., Hansen, B.B., Egsgaard, H., Demartini, N., Jensen, P.A., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., 2014. Release of chlorine and sulfur during biomass torrefaction and pyrolysis. Energy Fuels 28, 3738–3746. https://doi.org/10.1021/ef4021262.
Sánchez-Vioque, R., Polissiou, M., Astraka, K., Mozos-Pascual, M. de los, Tarantilis, P., Herraiz-Peñalver, D., Santana-Méridas, O., 2013. Polyphenol composition and antioxidant and metal chelating activities of the solid residues from the essential oil industry. Ind. Crops Prod. 49, 150–159. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.053.
Shen, J., Zhou, X., Zhou, L., Huang, Z., Huang, S., 2023. Effect of sludge conditioning by microbial fuel cell on electro-dewatering performance. J. Water Process Eng. 55, 104137. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104137.
Sihlangu, E., Luseba, D., Regnier, T., Magama, P., Chiyanzu, I., Nephawe, K.A., 2024. Investigating methane, carbon dioxide, ammonia, and hydrogen sulphide content in agricultural waste during biogas production. Sustainability 16, 5145. https://doi.org/10.3390/su16125145.
Singh, Rakshapal, Singh, Rashmi, Soni, S.K., Singh, S.P., Chauhan, U.K., Kalra, A., 2013. Vermicompost from biodegraded distillation waste improves soil properties and essential oil yield of pogostemon cablin (patchouli) benth. Appl. Soil Ecol. 70, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.04.007.
Sitka, A., Szulc, P., Smykowski, D., Jodkowski, W., 2021. Application of poultry manure as an energy resource by its gasification in a prototype rotary counterflow gasifier. Renew. Energy 175, 422–429. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.126.
Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P., Bouloumpasi, E., Biliaderis, C.G., 2022. Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry: potential uses in food applications. Food Chem. Adv. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100065.
Steffen, F., Requejo, A., Ewald, C., Janzon, R., Saake, B., 2016. Anaerobic digestion of fines from recovered paper processing – influence of fiber source, lignin and ash content on biogas potential. Bioresour. Technol. 200, 506–513. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.014.
Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., Seshadri, S., 2016. Production, characterization and evaluation of biochar from pod (Pisum sativum), leaf (Brassica oleracea) and peel (Citrus sinensis) wastes. Int. J. Recycl. Org. Waste Agric. 5, 43–53. https://doi.org/10.1007/s40093-016-0116-8.
Stolarski, M.J., Dudziec, P., Olba-Zięty, E., Stachowicz, P., Krzyżaniak, M., 2022. Forest dendromass as energy feedstock: diversity of properties and composition depending on systematic genus and organ. Energ. (Basel). https://doi.org/10.3390/en15041442.
Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., 2020. Energy value of yield and biomass quality of poplar grown in two consecutive 4-year harvest rotations in the north-east of Poland. Energ. (Basel) 13. https://doi.org/10.3390/en13061495.
Stolarski, Mariusz Jerzy, Welenc, M., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., Wierzbicki, S., 2024a. Characteristics and changes in the properties of cereal and rapeseed straw used as energy feedstock. Energies 17. https://doi.org/10.3390/en17051243.
Stolarski, Mariusz Jerzy, Wojciechowska, N., Seliwiak, M., Dobrzański, T.K., 2024b. Properties of forest tree branches as an energy feedstock in north-eastern Poland. Energies 17. https://doi.org/10.3390/en17081975.
Stolarski, Mariusz, J., Dudziec, P., Krzyżaniak, M., Graban, Ł., Lajszner, W., Olba–Zięty, E., 2024. How do key for the bioenergy industry properties of baled biomass change over two years of storage. ? Renew. Energy 224. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120236.
Strzelczyk, M., Chudy, M., Łochyńska, M., Gimbut, M., Krawczyk, K., 2023. Influence of cultivar, harvest date, and selected weather conditions on the essential oils content in inflorescences of hemp cannabis sativa l. J. Nat. Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2163332.
Suárez-Rivero, D., Marín-Mahecha, O., Ortiz-Aguilar, J., Ballesteros-Rosero, L.C., Fuentes-Reinés, J.M., de Jesús Guzmán-Hernández, T., 2021. Estimation of fixed carbon by ignition of corn fruit residues treated with electromagnetic fields. Chem. Eng. Trans. https://doi.org/10.3303/CET2187083.
Sumardiono, S., Hawali Abdul Matin, H., Ivan Hartono, I., Choiruly, L., Budiyono, 2022. Biogas production from corn stalk as agricultural waste containing high cellulose material by anaerobic process. Mater. Today Proc. 63, S477–S483. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.135.
Tajmirriahi, M., Ghobadian, B., Tavakoli, T., Khoshtaghaza, M.H., Najafi, G., 2021. Techno-economic and environmental analysis of biomass and municipal solid waste gasification for power generation in Iran. Renew. Energy 180, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.071.
Tamilselvan, R., Selwynraj, A.I., 2024. Visible light driven g-C3N4 photocatalytic pretreatment of rice straw for enhanced biogas production. Indian J. Chem. Technol. 31, 762–769. https://doi.org/10.56042/ijct.v31i5.5886.
Tang, Q., Chen, Y., Yang, H., Liu, M., Xiao, H., Wu, Z., Chen, H., Naqvi, S.R., 2020. Prediction of bio-oil yield and hydrogen contents based on machine learning method: effect of biomass compositions and pyrolysis conditions. Energy Fuels 34, 11050–11060. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01893.
Tang, X., Liu, Q., Zhong, W., Wang, T., 2024. Ash deposition characteristics during oxy-fuel combustion of biomass in a drop tube furnace. Biomass.. Convers. Biorefin 14, 18499–18511. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04020-3.
Tavares, C.S., Martins, A., Miguel, M.G., Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Gameiro, J.A., Figueiredo, A.C., Roseiro, L.B., 2020. Bioproducts from forest biomass II. Bioactive compounds from the steam-distillation by-products of cupressus lusitanica mill. And cistus ladanifer L. Wastes. Ind. Crops Prod. 158. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112991.
Teixeira, B.M.M., Oliveira, M., da Silva Borges, A.D., 2024. Coniferous biomass for energy valorization: a thermo-chemical properties analysis. Sustainability 16, 7622. https://doi.org/10.3390/su16177622.
Thakur, N., Salama, E.-S., Sharma, M., Sharma, P., Sharma, D., Li, X., 2022. Efficient utilization and management of seaweed biomass for biogas production. Mater. Today Sustain. 18, 100120. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100120.
Veličković, D.T., Milenović, D.M., Ristić, M.S., Veljković, V.B., 2008. Ultrasonic extraction of waste solid residues from the salvia sp. Essential oil hydrodistillation. Biochem Eng. J. 42, 97–104. https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.06.003.
Visković, J., Sikora, V., Latković, D., Zeremski, T., Dunđerski, D., Astatkie, T., Noller, J.S., Zheljazkov, V.D., 2024. Optimization of hemp production technology for fiber and seed. Ind. Crops Prod. 219. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119127.
Wang, L., Tester, J.W., 2023. Role of biomass extractives in hydrothermal processing: challenges and opportunities. Renew. Sustain. Energy Rev. 177, 113200. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113200.
Yeşilyurt, S., Gürgan, M., Sertkahya, M., 2024. Biologically active compounds from medicinal and aromatic plants for industrial applications. In: Kumar, L., Bharadvaja, N., Singh, R., Anand, R. (Eds.), Medicinal and aromatic plants: Current research status, value-addition to their waste, and agro-industrial potential (Vol I). Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60117-0_1.
Zhang, Y., Gao, X., Li, B., Zhang, H., Qi, B., Wu, Y., 2015. An expeditious methodology for estimating the exergy of woody biomass by means of heating values. Fuel 159, 712–719. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.102.
Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Semerdjieva, I.B., Kačániová, M., Astatkie, T., Dincheva, I., 2020. Grinding and fractionation during distillation alter hemp essential oil profile and its antimicrobial activity. Molecules 25. https://doi.org/10.3390/molecules25173943.

8.5. Publikacja: Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest



Energy efficiency in industrial hemp stalk production depending on cultivar and flower harvest

Paweł Dudziec[a], Mariusz J. Stolarski[a,b*]

[a] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Plant Breeding and Bioresource Engineering, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

[b] University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Centre for Bioeconomy and Renewable Energies, Plac Łódzki 3, 10–719, Olsztyn, Poland

*Corresponding author's email address: mariusz.stolarski@uwm.edu.pl

Abstract

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) is increasingly recognized as a promising energy crop; however, its energy balance depends on cultivar selection and the adopted production technology. This study quantified energy inputs, energy output and energy-efficiency indicators for the production of stalks and vegetative biomass as affected by cultivar, year/growing season and flower harvest. A field experiment was conducted in north-eastern Poland on a lessive soil using seven cultivars (Białobrzeskie, Henola, Santhica 27, Santhica 70, Earlina 8fc, Kompolti, Finola), grown with or without manual flower harvesting at flowering. Total energy input (diesel fuel, machinery, materials and labour) averaged approximately 13.54–13.84 GJ ha^{-1} and was dominated by material inputs (mainly mineral fertilisers; 58.3%), followed by diesel fuel (30.8%). Cultivar significantly affected yield and all energy indicators, whereas flower harvest had no significant effect on any parameter. Year/growing season significantly differentiated most of the assessed parameters. The highest

fresh stalk yield was obtained for Kompolti (26.75 Mg ha^{-1}); however, the best overall energy output was achieved by Białobrzeskie, which produced 131.93 GJ ha^{-1} from stalks and 151.36 GJ ha^{-1} from total vegetative biomass (excluding seeds), with corresponding energy ratios of 9.23 and 10.31. Including threshing residues (vegetative biomass) increased energy output and improved energy gain and energy ratio compared with the stalk-only assessment. Interannual variability was pronounced: in 2024, energy output and energy ratio were higher than in 2025, highlighting the importance of weather conditions nested within the growing season and cultivar choice for optimising energy systems based on industrial hemp.

Keywords: *Cannabis sativa*; hemp stalk; biomass; energy input; energy balance; energy ratio

1. Introduction

Fossil fuels have had a significant impact on economic and technological development and remain a major source of energy worldwide. However, due to their adverse environmental and social impacts, one objective of the European Union's (EU) bioeconomy strategy is to reduce reliance on non-renewable, unsustainable energy sources (European Commission, 2018). The EU's dependence on external fossil energy resource suppliers is very high, as the EU imports, on average, almost three-fifths of all the energy it needs. Poland's dependence on external supplies of fossil energy resources has also increased to almost 43% (Eurostat, 2023). Therefore, gaining independence from external energy supplies is a significant challenge for all EU countries. Recent geopolitical events have also highlighted the problems associated with dependence on energy, particularly fossil fuels, and the lack of alternative solutions. Therefore, given the current circumstances, replacing fossil fuels with renewable energy sources (RES) is an urgent necessity.

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) is a plant with a wide range of applications, including fiber, construction materials, and biofuel feedstocks, as well as numerous secondary products used in various sectors of the economy. Recent decades have seen a growing interest in the cultivation and processing of industrial hemp, driven by the development of new markets and the search for renewable feedstocks, including energy sources, for the bioeconomy. The modern approach to hemp increasingly recognizes it as a multi-purpose plant whose efficiency should be assessed at the level of the production system and/or biomass use (Das et al., 2017; Leoni et al., 2022; Sieracka et al., 2023; Sunoj Valiaparambil Sebastian et al., 2023). The rapid growth of industrial hemp, high biomass production, and a promising energy output-to-input ratio have led to its classification as an energy crop (Abreu et al., 2022; Gitsopoulos et al., 2024; Pan et al., 2025). According to the current FAOSTAT database, the largest areas under industrial hemp cultivation (hempseed and true hemp, raw or retted) are found in France (22,960 ha), the Democratic People's Republic of Korea (22,080 ha), and China (18,811 ha) (FAOSTAT 2026). Poland ranks 13th in the world with an area under cultivation of 1,050 ha.

In the context of the energy transition and the reduction of fossil fuel consumption, industrial hemp is identified as a promising bioenergy feedstock. Its usefulness in bioenergy chains and its potential for integration into crop rotation without directly displacing food production are emphasized. At the same time, the literature indicates that the assessment of hemp as an energy feedstock should consider not only the biomass yield potential but also energy efficiency, including the energy intensity of processes (Brar et al., 2022; Finnan & Styles, 2013; Ingrao et al., 2021; Viskovic et al., 2023).

Research conducted to date has shown that industrial hemp can achieve high biomass and energy yields, though these values are strongly dependent on agrotechnical factors, cultivars and the growing season (year). Field experiments have demonstrated the influence of, e.g.,

plant developmental stage on biomass yield and the energy value of whole plants, straw, and panicles, indicating the existence of optimal cultivation parameter combinations for energy purposes. Studies conducted under cool climate conditions have also confirmed that the harvest date can determine both the type of biomass use (e.g., biogas vs solid fuel) and the energy yield per unit area, with significant interannual variability (Kołodziej et al., 2023; Kreuger et al., 2011a; Prade et al., 2011).

From an energy-related perspective, however, it is not only biomass or energy yield that is crucial, but also the relationship between the energy obtained and the energy required for the production and preparation of the raw material. In this regard, it has been indicated that industrial hemp can offer a favorable energy balance and output/input ratio, yet the values of these parameters are significantly determined by the system boundaries, the biomass utilization scenario (e.g., combustion, briquetting, biogas), as well as the energy intensity of individual agrotechnical and technological stages (Kraszkiewicz et al., 2019; Prade et al., 2012; Teirumnieka et al., 2023). It should be noted that even partial replacement of mineral fertilizers with less energy-intensive organic fertilizers derived from post-production residues can improve the energy balance. Furthermore, it helps protect non-renewable resources used in the production of mineral fertilizers and reduces the consumption of fossil fuels used in their production, thereby also reducing greenhouse gas emissions (Jankowski et al., 2023; Krzyżaniak et al., 2019).

It is worth noting that the actual energy and environmental efficiency of hemp systems depends on the relationships between the harvest date, processing and final use of biomass. This applies both to systems using biomass for energy purposes, including biomass from problem areas (e.g., in the context of phytoremediation and energy recovery), and to chains focused on construction materials or seeds, where agrotechnical and technological decisions significantly impact cumulative energy consumption (Campiglia et al., 2020; Kiesse et al.,

2017; Nazari & Woods, 2025; Todde et al., 2022; Vavrova et al., 2022). For this reason, it is justified to combine, *inter alia*, field cultivation technology with a broader energy context. The fuel properties of individual biomass fractions, which determine the suitability of the raw material for combustion or other conversion pathways, are also important in assessing the energy potential of hemp. Studies indicate that industrial hemp stalk biomass exhibits suitable fuel properties, which reinforces the validity of energy analyses (Chaowana et al., 2024). In this context, field studies are still needed to assess the energy inputs of cultivation technologies, the energy value of the biomass produced, and indicators of hemp energy efficiency, depending on the genotype and the raw material acquisition strategy adopted. Therefore, the aim of the present study was to determine the energy inputs associated with hemp cultivation technology, the energy value of harvested biomass, and energy efficiency indicators for the production of hemp stalks and total vegetative biomass, depending on the cultivar and flower harvest, across three consecutive years of cultivation.

2. Materials and methods

2.1. Field experiment and presentation of results

The present study was based on a three-year field experiment conducted in 2023, 2024 and 2025 in north-eastern Poland (geographical coordinates: 53.71° N, 20.43° E). Total precipitation during the industrial hemp cultivation period was 290.4, 305.7, and 424.2 mm in 2023, 2024, and 2025, respectively. The average air temperatures were 13.0, 16.3 and 17.3 °C. The cultivation was carried out on a lessive soil. The granulometric composition of the arable soil layer corresponded to light dusty clay sand, clay (<0.002 mm) = 2.24%; loam (0.002−0.05 mm) = 25.62%; sand (0.05−2 mm) = 72.14%. Soil organic carbon = 0.81%; soil organic matter = 1.40%; pH = 4.7.

In this experiment, the first factor under study included the following seven industrial hemp cultivars (100 seeds germinated under laboratory conditions were always sown per square meter of cultivation area): Białobrzeskie (the volume of seeds sowed in each year = 15 kg ha^{-1}), Henola (16 kg ha^{-1}), Santhica 27 (20 kg ha^{-1}), Santhica 70 (20 kg ha^{-1}), Earlina 8fc (14 kg ha^{-1}), Kompolti (29 kg ha^{-1}), and Finola (14 kg ha^{-1}). The second factor under study was flower collection during the flowering stage/phase. The flowers (also referred to as inflorescences or panicles) were harvested by manually cutting off the panicles of female plants, located at the tops of the main shoots (with a maximum of approximately 15 cm being cut off). The third factor under study was the subsequent years (2023, 2024, 2025), although the main part of the manuscript did not include data from 2023 due to very difficult meteorological conditions at the beginning of the growing season, which resulted in very poor plant emergence, and the results obtained were not reliable in comparison with those from the following two years of study. Therefore, the main part of the manuscript presents results from statistical analyses of two years of the study (2024 and 2025), while data for 2023 are presented in the supplementary material (Tables S1−S7).

In the cultivation of industrial hemp in the autumn of the year preceding the sowing of seeds, lime was applied at a rate of 270 kg ha^{-1} CaO. In the spring, prior to sowing, ammonium nitrate was applied at a rate of 60 kg ha^{-1} N, triple superphosphate at a rate of 45 kg ha^{-1} P_2O_5, and K_2O at a rate of 60 kg ha^{-1}. During the growing season, a second nitrogen fertilizer dose of ammonium nitrate at 60 kg ha–1 N was applied. No pesticides were used during this three-year experiment.

2.2. Energy input analysis

Based on the methodology described by Stolarski et al. (2016; 2017; 2024) and Kwiatkowski et al. (2023), the total energy input (GJ ha^{-1}) associated with the production of industrial

149 hemp stalks comprised four main energy flows: (I) energy input for diesel fuel consumption;
150 (II) energy input for fixed assets (exploitation of tractors, machines and equipment); (III)
151 energy input for materials (seeds and mineral fertilizers); (IV) energy input for human labor.
152 Based on literature data (Neeft et al., 2011; Stolarski et al., 2024; Stolarski et al., 2017;
153 Szeptycki et al., 2003), the following energy conversion factors were adopted for: diesel fuel
154 (43.1 MJ kg^{-1}), lime (1.97 MJ kg^{-1} CaO), nitrogen fertilizers (48.99 MJ kg^{-1} N), potassium
155 fertilizers (9.68 MJ kg^{-1} K_2O), phosphorus fertilizers (15.23 MJ kg^{-1} P_2O_5), hemp seeds (12
156 MJ kg^{-1}), energy input for the use of tractors (125 MJ kg^{-1}) and machines (110 MJ kg^{-1}), and
157 human labor (60 MJ $hour^{-1}$). Table 1 presents detailed data on the individual stages of
158 industrial hemp cultivation and stalk chaff harvesting during the experimental years.
159
160 **Table 1**
161
162 **2.3. Energy output and energy efficiency analysis**
163 Since the hemp inflorescences were cut earlier (always at the flowering stage/phase), only the
164 stalk biomass was considered in the main assessment of the energy value of industrial hemp
165 biomass. The biomass of the stalks alone was weighed at harvest (which always occurred at
166 seed maturity, generally from September to November, depending on the cultivar and
167 growing season/year). At that time, biomass samples were also collected to determine
168 moisture content, higher heating value (HHV), and hydrogen content, from which the lower
169 heating value (LHV) of the stalks was calculated. The energy value of industrial hemp stalks,
170 i.e. energy output (GJ ha^{-1}), was then calculated as the product of the fresh stalk biomass
171 yield (Mg ha^{-1} f.m.) obtained at harvest, and their LHV (GJ Mg^{-1} f.m.) at a working moisture
172 content (%), also obtained at harvest, and the hydrogen content determined in the laboratory.
173 In the next stage, the energy gain (GJ ha^{-1}) from harvested stalks was calculated as the

174 difference between their energy output and the total energy input required to produce
175 industrial hemp stalks. Based on the ratio of total energy input to stalk biomass yield
176 expressed on a fresh matter basis (Mg ha^{-1} f.m.) as well as on a dry matter basis (Mg ha^{-1}
177 d.m.), the energy intensity of stalk production (GJ Mg^{-1} f.m. or d.m.) was also calculated.
178 Based on the ratio of total diesel fuel consumption (kg ha^{-1}) to stalk biomass yield expressed
179 on a fresh matter basis or on a dry matter basis, diesel fuel consumption per 1 Mg of fresh or
180 dry stalk biomass (kg Mg^{-1} f.m. or d.m.) was calculated. The energy ratio of industrial hemp
181 stalk production was also calculated as the ratio of energy output to total energy input. The
182 above analyses were conducted based on the methodology described by Stolarski et al. (2016;
183 2017; 2024) and Kwiatkowski et al. (2023).
184 As the vegetative biomass of industrial hemp (obtained from the final harvest at seed
185 maturity) consisted not only of stalks but also of threshing residue (bioconcentrate), in order
186 to illustrate the full energy value of the biomass, analyses and calculations were carried out
187 considering this remaining biomass (after seed extraction). Therefore, threshing
188 residue/bioconcentrate biomass was added to the stalk yield, thereby increasing both the yield
189 of total vegetative biomass (excluding seeds) and its energy value. Further calculations,
190 related to energy output and energy efficiency indicators for the total vegetative biomass
191 (excluding seeds), were performed in the same way as for the biomass of industrial hemp
192 stalks alone, as presented above.
193
194 **2.4. Statistical analysis**
195 The Shapiro-Wilk test was applied to check the normality of the traits under study. To
196 compare the distributions of the analyzed energy indicators, violin plots were created for
197 stalks and vegetative biomass. They were later used for a visual assessment of variable
198 distributions, combining an empirical probability density plot and a box plot. The plots were

199 created from raw data (the values observed in the experiment), without aggregating to group
200 averages, to preserve full information about the variability of the results. Each plot shows: the
201 kernel density estimator curve and its mirror image (a "violin" shape); a horizontal box plot
202 embedded inside the violin (interquartile range); the median line (box division); a red square
203 marking the mean value; the length of the whiskers (the range of variability beyond the
204 quartiles); a violin shape – density, including local expansions (a higher concentration of
205 observations); elongated tails (asymmetry/extreme values); and possible multimodality (more
206 than one area of increased density).
207 A three-factor analysis of variance (ANOVA) was performed, with cultivar, year, and flower
208 harvest as the main factors. Arithmetic means and standard deviations were calculated for all
209 of the traits under study. Using Tukey's significance test (HSD) (multiple–comparison test),
210 homogeneous groups were determined at a significance level of $P<0.05$. Agglomerative
211 hierarchical clustering analysis was performed for the cultivars. The data were standardized
212 within columns, agglomerated using Ward's method with Euclidean distance as the measure
213 of similarity (the results are presented as a dendrogram). All statistical analyses were
214 conducted using the STATISTICA 13 software (TIBCO Software Inc.).
215

216 **3. Results and discussion**

217 **3.1. Biomass yield and energy output**

218 The present study reports on the yield of fresh biomass, which was physically harvested and
219 directly affected the energy required to acquire it. The fresh biomass yield of industrial hemp
220 stalks alone was significantly differentiated by cultivar ($P<0.001$) and by the interaction
221 between cultivar and year ($P<0.001$). In contrast, the yield of whole vegetative biomass
222 (excluding seeds) was also significantly differentiated by cultivar ($P<0.001$) and year
223 ($P=0.010$) as well as by the interaction between these two factors (Table 2). In turn, the

224 calculated dry matter yield of both stalks alone and total vegetative biomass was significantly
225 differentiated by cultivar, year and the interaction between these two factors (P<0.001).
226
227 **Table 2**
228
229 The highest fresh stalk yield was obtained for the Kompolti cultivar (26.75 Mg ha^{-1} f.m.),
230 which was found exclusively in the homogeneous group “a” (Table 3). The vegetative
231 biomass yield (excluding seeds) was also highest for this cultivar (29.29 Mg ha^{-1} f.m.); it was
232 also found exclusively in group “a”. The lowest fresh stalk yield was noted for three cultivars,
233 which are referred to as flower-seed cultivars (low, “dwarf” cultivars that produce numerous
234 flowers and seeds; with a short development cycle): Earlina 8fc, Henola and Finola (10.44,
235 9.98, 5.26 Mg ha^{-1} f.m., respectively; all of them found exclusively in group “c”). In contrast,
236 the lowest vegetative biomass yield was noted for Finola (7.38 Mg ha^{-1} f.m., exclusively
237 group “d”). Henola was found in both “c” and “d” groups (12.39 Mg ha^{-1} f.m.), and Earlina
238 8fc exclusively in “c” group (13.96 Mg ha^{-1} f.m.). Overall, fresh stalk yield was influenced
239 only by cultivar and by the interaction between cultivar and year. In turn, fresh vegetative
240 biomass yield was additionally differentiated by year (as a single main factor) (Table 2).
241
242 The average dry biomass yield of industrial hemp stalks alone from the entire experiment was
243 6.54 Mg ha^{-1}, and the yield of the total vegetative biomass (excluding seeds) was, on average,
244 12% higher (Table 3). Among the cultivars under study, the highest yield of stalks alone was
245 noted for the Kompolti cultivar (on average, 9.56 Mg ha^{-1}, homogeneous group “a”). The
246 intermediate homogeneous group “ab” included the Białobrzeskie and Santhica 70 cultivars,
247 for which the dry stalk biomass yield was also over 9 Mg ha^{-1}. On the other hand, the
248 significantly lowest dry stalk biomass yield (on average, 1.96 Mg ha^{-1}, homogeneous group

249 “d”) was noted for the Finola cultivar. The yield of total vegetative biomass (excluding seeds)
250 was also the highest for the Kompolti cultivar (on average, 10.49 Mg ha^{-1}, homogeneous
251 group “a”), with the Białobrzeskie and Santhica 70 cultivars also found in the same
252 homogeneous group “a”. The lowest value of this indicator was also observed for the Finola
253 cultivar. The yield of dry stalk biomass (on average, 7.39 Mg ha^{-1}) as well as the total
254 vegetative biomass (excluding seeds) in 2024 was higher by 30% and 36%, respectively,
255 compared with 2025, which mainly resulted from more favorable climatic conditions for
256 industrial hemp (precipitation and temperature patterns in 2024; the 2024 growing season was
257 warmer and, at the same time, less rainy). On the other hand, the flower harvest conducted
258 during the flowering period did not significantly affect the dry biomass yield of either stalk or
259 total vegetative biomass.
260
261 **Table 3**
262
263 The highest vegetative mean biomass dry yield obtained (10.49 and 10.31 Mg ha^{-1} for the
264 Kompolti and Białobrzeskie cultivars, respectively) was lower than the mean biomass dry
265 yield of the Futura 75 cultivar cultivated in Sweden (15.6 Mg ha^{-1}, harvested in September
266 and October) (Kreuger et al., 2011a). This may be due to the different cultivar or soil site
267 (medium humus-rich sandy soil in Sweden vs lessive soil corresponding to light dusty clay
268 sand in Poland). In turn, in a study by Giannoulis et al. (2024), the dry biomass yield of the
269 Felina 32 cultivar was approximately 11 Mg ha^{-1} (at the last sampling, the plants were at the
270 harvest product growth stage), which was already comparable with the values for the two
271 cultivars mentioned above. It is worth noting that in the cited study conducted in Greece (at a
272 different latitude), higher nitrogen fertilization (140 kg ha−1) and irrigation at 33% of Eto
273 (reference evapotranspiration) were applied. In China, harvested stem yields ranged from 5.2

to 16.5 Mg ha^{-1} (Tang et al., 2022). The stalk yields of not all cultivars in the current study fell within the particular range. Earlina 8fc, Henola and Finola achieved stalk yields of 4.70, 3.81 and 1.96 Mg ha^{-1} d.m., respectively (Table 3). On favored sites, industrial hemp achieves a stalk yield of 10 Mg ha^{-1} d.m. (Reinhardt et al., 2021), and in the present experiment, no cultivar exceeded this yield (Table 3), which was not surprising considering the poor soil conditions (low pH; low organic carbon content; dominance of sand in the soil granulometric composition; or the light nature of the soil itself). The Kompolti cultivar came closest to reaching this threshold (9.56 Mg ha^{-1} d.m.).

The energy value of the stalk yield alone, as well as of the total vegetative biomass (excluding seeds) of industrial hemp (calculated on the basis of fresh biomass yield and its LHV), was significantly differentiated by cultivar and year of cultivation, as well as by the interaction between these two factors (P<0.001) (Table 2). The average energy value of the dry biomass yield of industrial hemp stalks alone was 89.67 GJ ha^{-1}, and the value of this indicator for the total vegetative biomass was, on average, 15% higher (Table 3). Among the cultivars studied, the highest energy value of the stalk yield alone was noted for the Białobrzeskie cultivar (on average, 131.93 GJ ha^{-1}, homogeneous group “a”). The intermediate homogeneous group “ab” included the Kompolti and Santhica 70 cultivars, for which this indicator was 4% and 7% lower, respectively. As for the other cultivars, the energy value of the yield was lower by 25% to 79% for the Santhica 27 and Finola cultivars, respectively, compared with the Białobrzeskie cultivar. Therefore, the order of the industrial hemp cultivars under study, in terms of the energy value of the stalks alone, was as follows: B>K>S70>S27>E>H>F. A similar relationship in the order of the cultivars under study was noted for the energy value of the total vegetative biomass, as the highest value was obtained for the Białobrzeskie cultivar (on average, 151.36 GJ ha^{-1}). However, the percentage differences between the cultivars were slightly different, as the energy value of the total biomass of the Kompolti cultivar was 7%

lower, and that of the Finola cultivar was 75% lower than that of the Białobrzeskie cultivar. The energy value of stalks (on average, 104.75 GJ ha^{-1}) as well as of the total vegetative biomass (127.65 GJ ha^{-1}) in 2024 was higher by 40% and 55%, respectively, compared with 2025, which was due, as mentioned earlier, to more favorable meteorological conditions (precipitation and temperature patterns) in 2024. The flower harvest, which was carried out during the flowering period, had no significant impact on the energy value of the crop in the case of stalks and vegetative biomass.

The interquartile range was greater for vegetative biomass, indicating greater variability in the middle 50% of observations (Fig. 1). This suggests that including additional biomass fractions increased not only the level of energy output but also the variation in results across the analyzed combinations of factors. In other words, extending the analysis from stalks alone to include the total vegetative biomass increased energy output but, at the same time, increased the variability in the system's response.

Fig. 1

In a study by Prade et al. (2011), biomass energy output (defined as combustion energy yield) of approximately 200 GJ ha^{-1} was obtained during the biomass harvest period (September–November) for the Futura 75 monoecious cultivar. This is approximately 49 GJ ha^{-1} more than the highest average biomass energy output obtained in the experiment for the Białobrzeskie monoecious cultivar (Table 3). This may be due, *inter alia*, to lower soil organic matter content (1.4 vs 2.7%), lower nitrogen fertilization (120 vs even 200 kg ha−1), or lower sowing rate (15 vs 20 kg ha^{-1}). On the other hand, it should also be emphasized that, in the current study, vegetative biomass yield excludes seeds, whereas in the study by Prade et al. (2011), seeds were probably included in the biomass yield.

At the same time, Prade et al. (2011) indicated that for hemp harvested in autumn, the range is 135–170 GJ ha^{-1}, meaning that only Białobrzeskie and Kompolti fell within this range (Table 3), the former being a monoecious cultivar, and the latter a dioecious cultivar. In another experiment, hemp biomass energy yield (an indicator identical to the energy output determined in the present study) reached almost 300 GJ ha^{-1} (Kreuger et al., 2011a), with the higher heating value (HHV) used instead of LHV in its calculation. As a result, this value was overestimated, e.g., by failing to account for the hydrogen content in biomass, which, during combustion, produces water that evaporates from the process. In practice, for combustion without exhaust gas condensation, the useful energy is closer to LHV, which accounts for losses due to water evaporation, depending, *inter alia*, on the hydrogen content of the fuel. The Białobrzeskie cultivar showed a higher vegetative biomass energy output (151.36 GJ ha^{-1}), compared with perennial energy crops such as *Silphium perfoliatum* (142.3 GJ ha^{-1} y^{-1}) or *Helianthus salicifolius* (124.7 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski et al., 2024). However, compared with *Miscanthus* × *giganteus*, it was lower (235–479 GJ ha^{-1} y^{-1})(Felten et al., 2013; Iqbal et al., 2015; Jankowski et al., 2016; Muylle et al., 2015).

Hemp stalks can be used as solid fuel, providing up to 246 GJ ha^{-1} (Chaowana et al., 2024), which is not reflected in the results of this experiment, where the average stalk energy output was, maximally, 131.93 GJ ha^{-1} $year^{-1}$ for the Białobrzeskie cultivar (Table 3). It is worth noting that stalks have a "hidden" energy value beyond combustion itself, e.g., in a biorefinery scenario, where co-production of ethanol and methane is possible (Kreuger et al., 2011b).

3.2. Energy inputs

The energy inputs for the production of industrial hemp stalks alone were significantly differentiated by cultivar and the interaction between cultivar and year (P<0.001) (Table 2).

In contrast, the energy inputs for the production of total vegetative biomass were significantly differentiated by species, year and the interaction between these two factors. Among the cultivars under study, the highest energy inputs for stalks alone (on average, 14.73 GJ ha^{-1}) were noted for the highest-yielding cultivar, Kompolti (Table 4). For the other six cultivars, the energy inputs for stalk production ranged from 12.13 to 14.46 GJ ha^{-1} for the Finola and Santhica 70 cultivars, respectively. In contrast, the energy inputs associated with the production of the total vegetative biomass of the cultivars under study ranged from 12.37 to 15.02 GJ ha^{-1} for the Finola and Kompolti cultivars, respectively. The energy inputs for stalk production and for total vegetative biomass in 2024 were slightly higher than in 2025, due to higher biomass yields. Similarly, higher energy inputs were noted for the flower harvest conducted at the flowering stage.

In the structure of stalk production energy flows, the consumption of materials (mainly mineral fertilizers) clearly dominated, averaging 58.3% (Fig. 2a). This was followed by diesel fuel, accounting for an average of 30.8%, while the use of tractors and machinery (6.0% on average) as well as human labor (5.0% on average) accounted for a significantly smaller proportion (detailed results are presented in Table 4). Very similar relationships were observed in the structure of energy inputs for total biomass, with a slight (1 p.p.) increase in diesel fuel inputs (detailed results are presented in Table S1). Differences in the distribution of inputs across individual energy streams were observed among the hemp cultivars studied, mainly due to varying biomass yields. Therefore, in the case of stalk production, material consumption ranged from 54.5% for the Kompolti cultivar to 64.7% for the Finola cultivar. In turn, diesel fuel consumption ranged from 25.5% to 33.9% for Finola and Kompolti, respectively.

Table 4

374

375 **Fig. 2**

376

377 A comparison of violin plots for total energy input showed that the distributions of energy
378 inputs for stalk and vegetative biomass production were very similar in terms of their position
379 and shape (Fig. 3). In both cases, the highest concentration of observations occurred within
380 the middle range of values (approximately 13–15 GJ ha^{-1}), and the distributions had a similar
381 total range and similar asymmetry. At the same time, for vegetative biomass, the distribution
382 shifted slightly to the right, indicating slightly higher total energy input values than in the
383 stalk-only variant.

384

385 **Fig. 3**

386

387 The average total energy inputs obtained for industrial hemp without differentiation by any of
388 the main factors (13.54 for stalk and 13.84 GJ ha^{-1} for vegetative biomass) (Table 4) was
389 higher compared with perennial industrial crops, such as *S. perfoliatum* (11.3 GJ ha^{-1} y^{-1}) or
390 *H. salicifolius* (9.2 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski et al., 2024). A lower total energy input for
391 industrial hemp (cultivar not specified) of 10.2 GJ ha^{-1} was obtained in studies conducted in
392 Lithuania (Romaneckas et al., 2023); however, significantly lower nitrogen fertilization (45 vs
393 120 kg ha^{-1}) and lower potassium fertilization (45 vs 60 kg ha^{-1}) were applied. According to
394 Finnan and Styles (2013), nitrogen fertilization is the main factor influencing energy inputs in
395 hemp cultivation. In the material input structure, the type and rate of fertilization generate the
396 highest energy inputs, with mineral fertilizers having high energy intensity indicators (Dubis
397 et al., 2020; Jankowski et al., 2021; Jankowski et al., 2020; Jankowski et al., 2016; Stolarski
398 et al., 2017). Therefore, it is possible to reduce energy inputs in the production of industrial

399 hemp stalks or vegetative biomass by using less energy-intensive fertilizers, e.g., organic
400 waste (Barbosa et al., 2014; Dubis et al., 2020). Finnan and Styles (2013) considered two
401 sources of nutrients for hemp: mineral fertilizers and organic fertilizers
402 (manure/slurry/sewage sludge). The application of organic fertilizers in the modelled
403 scenarios reduced cultivation emissions, increased the potential for emission reductions
404 throughout the chain, and improved the economics of cultivation compared with the mineral
405 fertilization option. Mineral nitrogen fertilization and liming can cause up to a threefold
406 increase in energy inputs, as observed with perennial *S. perfoliatum* (Siaudinis et al., 2017;
407 Siaudinis et al., 2012).
408
409 **3.3. Energy efficiency**
410 **3.3.1. Energy gain**
411 The energy gain from the production of stalks alone and the total vegetative biomass of
412 industrial hemp were significantly differentiated ($P<0.001$) by species, year, and the
413 interaction between these two factors (Table 2). The average energy gain for industrial hemp
414 stalks alone was 76.13 GJ ha^{-1}, and the value of this indicator for the total vegetative biomass
415 was, on average, 20% higher (Fig. 4 a,b, Table S9). Among the cultivars under study, the
416 highest energy gain value for stalks was noted for the Białobrzeskie cultivar (on average,
417 117.72 GJ ha^{-1}). The intermediate homogeneous group "ab" included the Kompolti and
418 Santhica 70 cultivars, for which the value of this indicator was lower by 5% and 8%,
419 respectively. As for the other cultivars, the energy value of the yield was lower by 28% to
420 87% for the Santhica 27 and Finola cultivars, respectively, compared with the Białobrzeskie
421 cultivar. Similar relationships between the cultivars under study were observed for energy
422 gain obtained from the total vegetative biomass, as the highest value was obtained for the
423 Białobrzeskie cultivar (on average, 136.79 GJ ha^{-1}), and the lowest was for Finola (on

average, only 26.13 GJ ha^{-1}). In 2024, the energy gain of stalks (on average, 91.13 GJ ha^{-1}) as well as of the total vegetative biomass (113.65 GJ ha^{-1}) was higher by 49% and 65%, respectively, compared with 2025, which was mainly due to higher biomass yields obtained in 2024. In contrast, the flower harvest, conducted during the flowering period, had no significant effect on the final energy gain of stalks or on total vegetative biomass.

Fig. 4

A more pronounced/slightly longer right tail (and a higher upper range) was observed in the violin plot for vegetative biomass, meaning that some combinations achieved particularly high energy gain values (Fig. 5). Therefore, the potential of the "best combinations" was more evident when analyzing the total vegetative biomass rather than the stalks alone. It follows that evaluating only the stalk fraction may underestimate the energy potential of the best technological combinations. Interestingly, despite the higher energy gain for vegetative biomass, the distributions overlapped (particularly in the middle). This meant that not every observation of energy gain from vegetative biomass had to be significantly higher than energy gain from stalks (this was also less clearly visible at the level of average values, e.g., Santhica 70: 108 vs 116 GJ ha^{-1}, or the year 2025: 61.12 vs 68.95 GJ ha^{-1}, Table S9). The effect was clearly visible at the distribution level, and a common value zone was observed.

Fig. 5

In a study conducted in Lithuania, net energy (equivalent to energy gain) for industrial hemp biomass was 139.9 GJ ha^{-1} (Romaneckas et al., 2023), which was comparable with that for the Białobrzeskie cultivar for vegetative biomass (136.79 GJ ha^{-1}, Table S9), while the other

449 cultivars produced lower energy gains. In turn, Kolarikova et al. (2013) obtained, for
450 Białobrzeskie, 164.1 GJ ha^{-1} for the autumn harvest, and 144.5 GJ ha^{-1} for the spring harvest,
451 using HHV for the calculations, which may have overestimated the results (in the current
452 study, LHV was used in the calculations, and that also considers the hydrogen content in the
453 biomass). On the other hand, in the study by Kolarikova et al. (2013), energy input included
454 not only the field stage, but also subsequent solid fuel preparation operations (including
455 briquetting and, for the autumn harvest, also additional drying), which may have
456 overestimated the energy input value compared with analyses limited to cultivation alone,
457 thus reducing energy gain. In the "solid biofuel" chain, processing (compacting/briquetting)
458 can be the largest energy consumer (Kolarikova et al., 2014). This clearly showed that the
459 energy gain is determined by the adopted boundaries of the system. Białobrzeskie achieved
460 higher energy gain compared with camelina (*Camelina sativa*) or spelt (*Triticum spelta*) (on
461 average, 84.62 and 91.62 GJ ha^{-1}, respectively) (Stolarski et al., 2025). This gain was also
462 higher compared with perennial industrial crops *S. perfoliatum* (on average, 131.0 GJ ha^{-1} y^{-1})
463 and *H. salicifolius* (on average, 115.4 GJ ha^{-1} y^{-1}) (Stolarski et al., 2024). However, when
464 considering sites where mineral nitrogen fertilization at 85 kg ha^{-1} y^{-1} was applied, the energy
465 gain of both *S. perfoliatum* was higher (on average, 145.1 GJ ha^{-1} y^{-1}), while that of *H.*
466 *salicifolius* remained lower (on average, 128 GJ ha^{-1} y^{-1}). Considerably higher energy gains
467 (213–449 GJ ha^{-1} y^{-1}) were obtained from the production of giant miscanthus *M.* × *giganteus*
468 (Dubis et al., 2020; Felten et al., 2013; Iqbal et al., 2015; Jankowski et al., 2016,).
469
470 **3.3.2. Energy intensity and diesel fuel consumption**
471 The energy intensity of producing 1 Mg f.m. of industrial hemp was significantly
472 differentiated by cultivar and the interaction between cultivar and year of cultivation, as well
473 as between cultivar and flower harvest (Table 2). In turn, the energy intensity of producing 1

474 Mg d.m. was significantly differentiated by cultivar and year, as well as the interaction
475 between these two factors. An average of 1.15 GJ Mg^{-1} f.m. was consumed to produce 1 Mg
476 of fresh stalk chips alone, and in the case of the total vegetative biomass, this value was 21%
477 lower (Table 5, S10). Among the cultivars under study, the lowest energy intensity for fresh
478 stalk chips was noted for Santhica 70 (0.60 GJ Mg^{-1} f.m.). The Białobrzeskie, Kompolti and
479 Santhica 27 cultivars were found in the same homogeneous group. In contrast, for the other
480 cultivars, the value of this indicator was higher, ranging from 120 to 309% for Earlina and
481 Finola, respectively. The energy intensity indicator for the production of dry stalk chips
482 averaged 2.97 GJ Mg^{-1} d.m., whereas for the total vegetative biomass, it was 17% lower.
483 Among the cultivars under study, the lowest value of this indicator relative to dry matter was
484 observed for Białobrzeskie (1.59 GJ Mg^{-1} d.m.). The Santhica 70, Santhica 27 and Kompolti
485 cultivars were found in the same homogeneous group. In contrast, for the other cultivars, the
486 value of this indicator was higher, ranging from 78 to 329% for Earlina and Finola,
487 respectively. The energy intensity of dry stalks in 2024 was significantly lower (on average,
488 2.74 GJ Mg^{-1} d.m.) compared with 2025.
489
490 **Table 5**
491
492 The interquartile range for fresh vegetative biomass was smaller compared with that for
493 stalks, so the middle 50% of observations for vegetative biomass were more concentrated,
494 meaning that the energy intensity indicator was more stable between combinations of factors
495 (Fig. 6). For stalks, there were more frequent cases of increased energy intensity, while for
496 vegetative biomass, there were fewer of them (a comparison of the length and height of the
497 right tails for both distributions). Vegetative biomass was characterized by a higher and
498 narrower density peak (a stronger concentration of results), while stalks had a lower and more

499 "spread out" peak, which further reinforced the conclusion of greater homogeneity of the
500 results for vegetative biomass.

501

502 **Fig. 6**

503

504 There is a lack of studies defining energy intensity for industrial hemp cultivation, although
505 some studies have determined, *inter alia*, energy input or biomass yield (Kolarikova et al.,
506 2014; Kolarikova et al., 2013). The lowest energy intensity indicators obtained for Santhica
507 70, Białobrzeskie, Kompolti and Santhica 27 (0.60−0.78 GJ Mg^{-1} f.m. for stalks, and
508 0.56−0.67 GJ Mg^{-1} f.m. for vegetative biomass; Table 5, S10) were higher compared with the
509 average values defined for perennials *S. perfoliatum* or *H. salicifolius* (0.34 and 0.49 GJ Mg^{-1}
510 f.m., respectively) (Stolarski et al., 2024). After considering mineral nitrogen fertilization at a
511 rate of 85 kg ha^{-1}, these values were also lower (0.36 and 0.49 GJ Mg^{-1} f.m., respectively).
512 Only with mineral nitrogen fertilization at 170 kg ha^{-1}, these values corresponded to the
513 lowest ones for industrial hemp, but only in the case of *H. salicifolius* (0.61 GJ Mg^{-1} f.m.). *S.*
514 *perfoliatum* (0.40 GJ Mg^{-1} f.m.) still did not fall within the indicated range of the lowest
515 energy intensity values for industrial hemp. This is well illustrated by the increase in energy
516 intensity, resulting from increasing fertilizer doses (in the present experiment, 120 kg ha^{-1} of
517 mineral nitrogen were applied to hemp each time). In contrast, the energy intensity
518 determined for the dry matter of the same hemp cultivars (1.59–2.12 GJ Mg^{-1} d.m. for stalks,
519 and 1.49–1.88 GJ Mg^{-1} d.m. for vegetative biomass; Table 5, S10) was, in turn, similar to the
520 average value for *H. salicifolius* and *S. perfoliatum* (1.4 GJ Mg^{-1} d.m. for both species)
521 (Stolarski et al., 2024). This was also the case for mineral nitrogen fertilization at a rate of 85
522 kg ha^{-1} (1.4 GJ Mg^{-1} d.m. for both species). A nitrogen dose of 170 kg ha^{-1} resulted in the
523 energy intensity of these two species falling within the above-mentioned range for hemp (1.7

524 and 1.8 GJ Mg^{-1} d.m., respectively). The energy intensity of industrial hemp, calculated on a
525 dry matter basis, was more favorable in comparison with these two perennials, as the moisture
526 content of the fresh matter of the perennials was higher than that of industrial hemp.
527 Indicators expressed in GJ Mg^{-1} f.m. favor species harvested with a higher moisture content,
528 as with similar inputs per hectare, there are more tons of fresh biomass in the denominator.
529 After conversion to dry matter, the influence of water is eliminated, and the comparison
530 concerns the actual mass of the organic matter obtained, which reduced the advantages
531 observed in the conversion to fresh matter. The energy intensity for yet another perennial,
532 Virginia mallow *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, had an average value (from a thirteen-year
533 experiment) of 3.26 GJ Mg^{-1} y^{-1} d.m. (Kwiatkowski et al., 2023), and thus higher than that for
534 the best industrial hemp cultivars from the present experiment. In contrast, a significantly
535 lower energy intensity was obtained for giant miscanthus *M.* × *giganteus* (0.24–0.74 GJ Mg^{-1}
536 d.m.) (Iqbal et al., 2015; Jankowski et al., 2016), willow *Salix* spp. (0.59–0.79 GJ Mg^{-1} d.m.)
537 or poplar *Populus* spp. (0.65–0.85 GJ Mg^{-1} d.m.) (Stolarski et al., 2016).

538 Diesel fuel consumption for producing 1 Mg f.m. of industrial hemp was significantly
539 differentiated by cultivar and the interaction between cultivar and year of cultivation, as well
540 as between cultivar and the flower harvest (Table 2). In turn, diesel fuel consumption for
541 producing 1 Mg d.m. was significantly differentiated by cultivar and year, as well as the
542 interaction between these two factors. An average of 7.52 kg Mg^{-1} f.m. of diesel fuel was
543 consumed to produce 1 Mg of fresh stalk chips alone, and in the case of the total vegetative
544 biomass, this value was 17% lower (Table 5, S10). Among the cultivars under study, the
545 lowest diesel fuel consumption for the production of fresh stalk chips was observed for
546 Santhica 70 (4.59 kg Mg^{-1} f.m.). The Santhica 27, Białobrzeskie and Kompolti cultivars were
547 found in the same homogeneous group. In contrast, for the other cultivars, the value of this
548 indicator was higher, ranging from 82 to 212% for Earlina 8fc and Finola, respectively. The

549 diesel fuel consumption indicator for the production of dry stalk chips was, on average, 19.53
550 GJ Mg^{-1} d.m., whereas for the total vegetative biomass, it was 13% lower. Among the
551 cultivars under study, the lowest value of this indicator relative to dry matter was observed for
552 Białobrzeskie (12.10 kg Mg^{-1} d.m.). The same homogeneous group included the cultivars
553 Santhica 70, Santhica 27, Earlina and Kompolti. In contrast, for Henola and Finola, the value
554 of this indicator was as high as 24.93 and 40.02 kg Mg^{-1} d.m., respectively. Diesel fuel
555 consumption of dry stalks in 2024 was significantly lower (on average, 17.90 GJ Mg^{-1} d.m.)
556 compared with 2025 (on average, 21.16 GJ Mg^{-1} d.m.).
557 The lowest diesel fuel consumption per fresh stalk weight, noted for Santhica 70,
558 Białobrzeskie, Kompolti and Santhica 27 stalks (4.59−5.54 kg Mg^{-1} f.m.) was higher than that
559 for energy crops such as *S. perfoliatum* or *H. salicifolius* with mineral nitrogen fertilization at
560 85 and 170 kg ha^{-1} (3.1 and 3.0 kg Mg^{-1} f.m. for *S. perfoliatum*, and 3.3 and 3.1 kg Mg^{-1} f.m.
561 for *H. salicifolius*, respectively) (Stolarski et al., 2024). However, in terms of dry matter,
562 industrial hemp stalk diesel consumption amounted to 12.10−15.19 kg Mg^{-1} d.m. for the same
563 cultivars (Table 5), which brought it closer to the consumption determined for *S. perfoliatum*
564 at the indicated fertilization rates (11.8 and 12.4 kg Mg^{-1} d.m. for *S. perfoliatum*,
565 respectively). In comparison with *H. salicifolius* (9.2 and 8.4 kg Mg^{-1} d.m., respectively),
566 industrial hemp diesel consumption was still higher. This was also the case for diesel
567 consumption for dry vegetative biomass (the lowest values for the same industrial hemp
568 cultivars were in the range of 11.74–14.02 kg Mg^{-1} d.m., Table S10). Diesel fuel consumption
569 for industrial hemp stalks as well as vegetative biomass was higher compared with the
570 production of willow chips (9.6–10.2 kg Mg^{-1} d.m.) and poplar chips (10.6–11.3 kg Mg^{-1}
571 d.m.) (Stolarski et al., 2016). It is worth noting that industrial hemp can also be produced
572 under indoor conditions, which is more resource- and energy-intensive (Meffo Kemda et al.,
573 2024). The current study concerned outdoor cultivation, yet in indoor cultivation, diesel

574 consumption is likely to be even higher. Todde et al. (2022) noted that in industrial hemp
575 supply chain scenarios, the field cultivation stage was the most influential subsystem in the
576 environmental assessment, underscoring the importance of field inputs, including diesel
577 consumption.
578
579 **3.3.3. Energy ratio**
580 The energy ratio of producing chips from stalks alone and from the total vegetative biomass
581 of industrial hemp was significantly (P<0.001) differentiated by cultivar and year, as well as
582 by the interaction between these two factors (Table 2). The energy ratio of chip production
583 from industrial hemp stalks alone from the entire experiment was, on average, 6.39, with the
584 value of this indicator for the total vegetative biomass (excluding seeds) being, on average,
585 15% higher (Fig. 7 a, b; Table S11). Among the cultivars under study, the highest energy ratio
586 for producing stalks alone was noted for the Białobrzeskie cultivar (on average, 9.23,
587 homogeneous group "a"'). The intermediate homogeneous group "ab" included the Kompolti
588 and Santhica 70 cultivars, for which the value of this indicator for stalks was lower, in the
589 range of 9-10%. For the other cultivars, the energy ratio for stalks was lower by 24-76% in
590 Santhica 27 and Finola, respectively, compared with the Białobrzeskie cultivar. In view of the
591 above, the order of the industrial hemp cultivars under study, in terms of the energy ratio of
592 the stalks alone, was as follows: B>S70>K>S27>E>H>F. Similar relationships in the order of
593 the cultivars under study were observed for the energy ratio of total vegetative biomass, with
594 the highest value (on average, 10.31) for the Białobrzeskie cultivar and the lowest (on
595 average, 3.09) for the Finola cultivar. In 2024, the average energy ratio of stalks alone (7.37)
596 and of total vegetative biomass (8.82) were 36% and 49% higher, respectively, than in 2025,
597 mainly due to higher biomass yields in 2024 despite similar energy inputs. In contrast, the
598 flower harvest (manual harvesting of flowers was carried out each time during the flowering

599 period) had no significant impact on the energy ratio for either stalks or total vegetative
600 biomass.
601
602 **Fig. 7**
603
604 After considering the total vegetative biomass, a shift of the entire distribution towards higher
605 energy ratio values was observed (Fig. 8). At the same time, in both cases (stalks and
606 vegetative biomass), the distributions had a similar shape, with the highest concentration of
607 observations in the middle range of energy ratio values, and a moderately elongated right tail.
608 This meant that in some combinations of factors, there were relatively high energy ratio
609 values, but they did not dominate the entire data set. An analysis of elements of the boxplot
610 embedded in the violin plot also indicated that the interquartile range was comparable, with a
611 tendency towards a slightly greater range of variation for vegetative biomass. This suggests
612 that the inclusion of additional biomass fractions not only increased the energy ratio but may
613 also have exacerbated differences between the analyzed combinations of cultivars, year and
614 flower harvest.
615 Higher energy ratios for vegetative biomass compared with those for stalks alone were a
616 logical consequence of increased energy output from the inclusion of an additional biomass
617 fraction, while the energy inputs of the cultivation technology remained largely similar at the
618 level of the production system applied. In practice, this means that a broader approach to
619 biomass after seed harvesting (beyond stalks alone) may improve the assessment of hemp
620 cultivation's energy efficiency. From the perspective of production practice and technology
621 assessment, this suggests that the choice of biomass fraction considered in the analysis
622 significantly impacts the final interpretation of the energy efficiency of the system.
623

624 **Fig. 8**

625

626 The highest average energy ratios obtained for the Białobrzeskie industrial hemp cultivar
627 (9.23 for the production of wood chips from stalks alone, and 10.31 for vegetative biomass)
628 (Fig. 7) were higher compared with the same cultivar grown in Czechia, where the energy
629 ratio was 8.6 for the spring harvest, and 7.4 for the autumn harvest (Kolarikova et al., 2013).
630 The energy ratio for the spring harvest was higher, as energy consumption was significantly
631 reduced by eliminating dryers, which were not needed given the biomass's low moisture
632 content during the period concerned (19%). Despite this, the energy ratio was still lower
633 compared with that for Białobrzeskie in the current study, which may have been due to the
634 broader scope of the system in the Czech study, which also considered the briquetting of
635 hemp biomass, i.e., an additional source of energy demand. Another study conducted in
636 Moldova obtained higher energy ratios than those in the current study, i.e., 13.1 for the
637 Białobrzeskie cultivar (Kolarikova et al., 2014). However, the study considered the specific
638 nature of agriculture in Moldova at the time, i.e., the high proportion of manual labor and the
639 absence of fertilization, which, despite the additional input from briquetting, resulted in a high
640 energy ratio. In addition, the energy in harvestable biomass (a concept identical to energy
641 output) was higher (191.9 vs 151.36 GJ ha^{-1} for vegetative biomass, Table 3).
642 However, the highest energy ratio for Białobrzeskie (9.23 for stalks, and 10.31 for vegetative
643 biomass, Fig. 7) was, in most cases, lower than that for perennial energy crops such as
644 *H. salicifolius* (13.3 with mineral nitrogen fertilization at 85 kg ha^{-1}, and 10.2 with
645 fertilization at 170 kg ha^{-1}) or *S. perfoliatum* (14.2 with mineral nitrogen fertilization at 85 kg
646 ha^{-1}, and 12.8 with fertilization at 170 kg ha^{-1}) (Stolarski et al., 2024). Compared with
647 another perennial energy crop, *S. hermaphrodita* (mean energy ratio for three types of
648 propagating material at two initial sowing/planting densities, in eight replicates, over a 13-

649 year period: 14.8) (Kwiatkowski et al., 2023), industrial hemp performed worse. Furthermore,
650 among the various species of perennial industrial energy crops, the production of *M.* ×
651 *giganteus* can achieve an energy ratio of up to 40 (Boehmel et al., 2008; Iqbal et al., 2015;
652 Muylle et al., 2015). The energy ratio for the production of other perennial industrial energy
653 crops can also be high, reaching almost 30 for willow, and 26 for poplar (Stolarski et al.,
654 2016). The higher energy ratio for perennial crops may result, e.g., from the fact that this
655 group does not require the same annual energy inputs (Kolarikova et al., 2013).
656 The energy ratio for the production of energy crops can be significantly improved by using
657 fertilizers derived from residues/recycling (Dubis et al., 2022; Dubis et al., 2020; Gissen et al.,
658 2014; Jankowski et al., 2021). This is important because the current experiment applied only
659 mineral fertilization, and only at a single fixed dose. For example, after replacing mineral
660 fertilizers with sewage sludge, the energy ratio in the production of Jerusalem artichoke *H.*
661 *tuberosus* L. increased by 78–89% (Jankowski et al., 2021); giant miscanthus *M.* × *giganteus*
662 by 43–52% (Dubis et al., 2020); and amur silvergrass *M. sacchariflorus*, by 63–70% (Dubis et
663 al., 2022).
664

665 **3.4. Variation among industrial hemp cultivars**

666 The cultivar was the only factor that, considering all factors and interactions, differentiated all
667 of the studied parameters (Table 2). This emphasizes the importance of cultivar selection in
668 influencing energy efficiency results, with significant differences. Cluster analysis showed a
669 clear division of the cultivars under study into two main clusters, which only merged at the
670 maximum normalized binding distance, which indicates their clear distinctiveness (Fig. 9).
671 The first cluster included Białobrzeskie, Santhica 70, Santhica 27 and Kompolti (tall,
672 fiber/biomass cultivars with a longer development cycle), while the second cluster included
673 Henola, Earlina 8fc and Finola (short, flower-seed cultivars with a shorter development

674 cycle). Within the first cluster, the greatest similarity was observed between the Białobrzeskie
675 and Santhica 70 cultivars, which were then joined by Santhica 27, and later by Kompolti. In
676 the second cluster, Henola and Earlina 8fc were the most similar, while Finola showed greater
677 distinctiveness and joined this group at a higher binding distance. Overall, Finola stood out
678 the most from the other cultivars (the shortest cultivar with the shortest development cycle).
679
680 **Fig. 9**
681
682 **4. Conclusions**
683 The study concluded that the biomass yield of industrial hemp stalks alone (i.e. residues after
684 the use of inflorescences/bioconcentrate for bio-products with a higher added value), energy
685 inputs for their production, energy gain, energy ratio, and other energy efficiency indicators
686 were mainly differentiated by cultivar, partly by years of study/growing seasons, and the
687 interaction between these factors. Flower harvest, on the other hand, did not significantly
688 differentiate the parameters studied in this manuscript. In general, the oldest domestic (native)
689 industrial hemp cultivar (Białobrzeskie), with a longer growing season, showed the highest
690 values for indicators such as stalk yield, energy value, energy gain, and energy ratio.
691 Indicators were quite similar, though lower, for the older non-native cultivar Kompolti and
692 the non-native cultivar Santhica 70, which had the longest growing seasons. In contrast, the
693 definitely lowest indicators in this regard were obtained for the Finola cultivar with the
694 shortest growing season. In addition, when total vegetative biomass (excluding seeds) was
695 considered, there was a significant increase in yield energy value, energy gain, and energy
696 ratio. This approach helped provide a more complete picture of the energy potential of
697 industrial hemp vegetative biomass.

Numerous studies on perennial energy crops examine the effect of different fertilization methods (mineral vs. organic) and different fertilizer doses on individual energy efficiency indicators. The present study applied only one type of fertilization and one dose; the differentiating factors included cultivar, year, and flower harvest. Overall, Białobrzeskie performed best among all the cultivars under study. It would therefore be worthwhile in the future to determine the most optimal type and dose(s) of fertilization to achieve even higher energy efficiency in industrial hemp cultivation. This is all the more important, as the use of natural fertilizers or fertilizers derived from residues (as opposed to artificial fertilizers) reduces energy input and increases the energy ratio. Apart from that, it would also be intriguing to compare the energy efficiency of cultivating industrial hemp, an energy crop, with that of semi-woody energy crops. Some energy-efficiency indicators in the present study showed that industrial hemp could compete with this group of perennial crops (though not with woody or herbaceous perennial energy crops). Such a field experiment would have to be conducted simultaneously at the same location and on the same soil site. This would ensure the greatest possible comparability of the results obtained.

Acknowledgements

This research results from a study carried out at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Plant Breeding and Bioresource Engineering, topic number 30.610.007-110. The project was supported by the Minister of Science under the "Regional Initiative of Excellence Program", RID/SP/0025/2024/01. The author would also like to thank the staff of the Department of Plant Breeding and Bioresource Engineering for their technical support during the experiment.

CRediT authorship contribution statement

Paweł Dudziec: Methodology; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data curation; Writing - original draft; Writing - review & editing; Visualization; Supervision; Project administration; **Mariusz Jerzy Stolarski**: Conceptualization; Methodology; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data curation; Writing - original draft; Writing - review & editing; Supervision; Project administration; Funding acquisition.

References

Abreu, M., Silva, L., Ribeiro, B., Ferreira, A., Alves, L., Paixão, S.M., Gouveia, L., Moura, P., Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Fernando, A.L., Reis, A., Gírio, F., 2022. Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels—A Review. Energies (Basel). https://doi.org/10.3390/en15124348

Barbosa, D.B.P., Nabel, M., Jablonowski, N.D., 2014. Biogas-digestate as Nutrient Source for Biomass Production of *Sida Hermaphrodita*, *Zea Mays* L. and *Medicago sativa* L. Energy Procedia 59, 120–126. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.357

Boehmel, C., Lewandowski, I., Claupein, W., 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. Agric Syst 96, 224–236. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.08.004

Brar, K.K., Raheja, Y., Chadha, B.S., Magdouli, S., Brar, S.K., Yang, Y.H., Bhatia, S.K., Koubaa, A., 2024. A paradigm shift towards production of sustainable bioenergy and advanced products from *Cannabis*/hemp biomass in Canada. Biomass Convers Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02570-6

Campiglia, E., Gobbi, L., Marucci, A., Rapa, M., Ruggieri, R., Vinci, G., 2020. Hemp seed production: Environmental impacts of *Cannabis sativa* L. Agronomic practices by life cycle assessment (LCA) and carbon footprint methodologies. Sustainability (Switzerland) 12. https://doi.org/10.3390/su12166570

Chaowana, P., Hnoocham, W., Chaiprapat, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Chaisan, T., Paopun, Y., Pisutpiched, S., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., 2024. Utilization of

750 hemp stalk as a potential resource for bioenergy. Mater Sci Energy Technol 7, 19–28.
751 https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.07.001
752 Das, L., Liu, E., Saeed, A., Williams, D.W., Hu, H., Li, C., Ray, A.E., Shi, J., 2017. Industrial hemp as
753 a potential bioenergy crop in comparison with kenaf, switchgrass and biomass sorghum.
754 Bioresour Technol 244, 641–649. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.008
755 Dubis, B., Jankowski, K.J., Załuski, D., Sokólski, M., 2020. The effect of sewage sludge fertilization
756 on the biomass yield of giant miscanthus and the energy balance of the production process.
757 Energy 206, 118189. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118189
758 Dubis, B., Szatkowski, A., Jankowski, K.J., 2022. Sewage sludge, digestate, and mineral fertilizer
759 application affects the yield and energy balance of Amur silvergrass. Ind Crops Prod 175,
760 114235. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114235
761 European, Commission, Bioeconomy, and Strategy. A Sustainable Bioeconomy for Europe:
762 Strengthening the Connection between Economy, Society and the Environment; European
763 Commission: Brussels, Belgium, 2018
764 Eurostat. Energy imports dependency. 2023.
765 https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_ID__custom_2529541/bookmark/tabl
766 e?lang=en&bookmarkId=30cc534e-9d11-4523-abf2-d6b6dfa32845, (date of access 24.11.2023)
767 FAOSTAT. Data Crops and livestock products. 2026. https://www.fao.org/faostat/en/#data, (date of
768 access 28.01.2026)
769 Felten, D., Fröba, N., Fries, J., Emmerling, C., 2013. Energy balances and greenhouse gas-mitigation
770 potentials of bioenergy cropping systems (Miscanthus, rapeseed, and maize) based on farming
771 conditions in Western Germany. Renew Energy 55, 160–174.
772 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.004
773 Finnan, J., Styles, D., 2013. Hemp: A more sustainable annual energy crop for climate and energy
774 policy. Energy Policy 58, 152–162. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.046
775 Giannoulis, K.D., Bartzialis, D., Gintsioudis, I., Danalatos, N.G., 2024. Cultivation Practices Affect
776 Biomass Yield and Quality of “Felina 32”, an Industrial Hemp Variety. Agronomy 14.
777 https://doi.org/10.3390/agronomy14112743

778 Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I.A., Rosenqvist, H., Svensson, S.E., Lantz, M., Mattsson,
779 J.E., Börjesson, P., Björnsson, L., 2014. Comparing energy crops for biogas production - Yields,
780 energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. Biomass Bioenergy
781 64, 199–210. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061
782 Gitsopoulos, T., Tsaliki, E., Korres, N.E., Georgoulas, I., Panoras, I., Botsoglou, D., Vazanelli, E.,
783 Fifis, K., Zisis, K., 2024. Response of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) to Herbicides and
784 Weed Control. International Journal of Plant Biology 15, 281–292.
785 https://doi.org/10.3390/ijpb15020024
786 Ingrao, C., Novelli, V., Valenti, F., Messineo, A., Arcidiacono, C., Huisingh, D., 2021. Feasibility of
787 usage of hemp as a feedstock for anaerobic digestion: Findings from a literature review of the
788 relevant technological and energy dimensions. Crit Rev Environ Sci Technol 51, 1129–1158.
789 https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1745036
790 Iqbal, Y., Gauder, M., Claupein, W., Graeff-Hönninger, S., Lewandowski, I., 2015. Yield and quality
791 development comparison between miscanthus and switchgrass over a period of 10 years. Energy
792 89, 268–276. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.134
793 Jankowski, K.J., Dubis, B., Budzyński, W.S., Bórawski, P., Bułkowska, K., 2016. Energy efficiency
794 of crops grown for biogas production in a large-scale farm in Poland. Energy 109, 277–286.
795 https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.087
796 Jankowski, K.J., Dubis, B., Kozak, M., 2021. Sewage sludge and the energy balance of *Jerusalem*
797 *artichoke* production - A case study in north-eastern Poland. Energy 236.
798 https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121545
799 Jankowski, K.J., Dubis, B., Sokólski, M.M., Załuski, D., Bórawski, P., Szempliński, W., 2020.
800 Productivity and energy balance of maize and sorghum grown for biogas in a large-area farm in
801 Poland: An 11-year field experiment. Ind Crops Prod 148.
802 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112326
803 Jankowski, K.J., Kołodziej, B., Dubis, B., Sugier, D., Antonkiewicz, J., Szatkowski, A., 2023. The
804 effect of sewage sludge on the energy balance of cup plant biomass production. A six-year field

805 experiment in Poland. Energy 276, 127478.
806 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127478
807 Kolarikova, M., Havrland, B., Ivanova, T., 2013. Energy Balance of Hemp (*Cannabis sativa* L.)
808 Grown for Energy Purposes. Agricultura tropica et subtropica 46, 10–15.
809 https://doi.org/10.2478/ats-2013-0002
810 Kolarikova, M., Ivanova, T., Havrland, B., Amonov, K., 2014. Evaluation of sustainability aspect-
811 energy balance of briquettes made of hemp biomass cultivated in Moldova, Agronomy Research.
812 Kołodziej, J., Pudełko, K., Mańkowski, J., 2023. Energy and Biomass Yield of Industrial Hemp
813 (*Cannabis sativa* L.) as Influenced by Seeding Rate and Harvest Time in Polish Agro-Climatic
814 Conditions. Journal of Natural Fibers 20. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2159609
815 Kraszkiewicz, A., Kachel, M., Parafiniuk, S., Zajac, G., Niedziółka, I., Sprawka, M., 2019.
816 Assessment of the possibility of using hemp biomass (*Cannabis sativa* L.) for energy purposes:
817 A case study. Applied Sciences (Switzerland) 9. https://doi.org/10.3390/app9204437
818 Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S.E., Englund, J.E., Björnsson, L., 2011. Anaerobic
819 digestion of industrial hemp-Effect of harvest time on methane energy yield per hectare. Biomass
820 Bioenergy 35, 893–900. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005
821 Kreuger, Emma, Sipos, B., Zacchi, G., Svensson, S.E., Björnsson, L., 2011. Bioconversion of
822 industrial hemp to ethanol and methane: The benefits of steam pretreatment and co-production.
823 Bioresour Technol 102, 3457–3465. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.126
824 Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Warmiński, K., 2019. Life cycle assessment of poplar production:
825 Environmental impact of different soil enrichment methods. J Clean Prod 206, 785–796.
826 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.180
827 Kwiatkowski, J., Graban, Ł., Stolarski, M.J., 2023. The energy efficiency of Virginia fanpetals
828 biomass production for solid biofuel. Energy 264. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126180
829 Leoni, M., Musio, S., Croci, M., Tang, K., Magagnini, G.M., Thouminot, C., Müssig, J., Amaducci,
830 S., 2022. The effect of agronomic management of hemp (*Cannabis sativa* L.) on stem processing
831 and fibre quality. Ind Crops Prod 188, 115520.
832 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115520

833 Meffo Kemda, M., Marchi, M., Neri, E., Marchettini, N., Niccolucci, V., 2024. Environmental impact
834 assessment of hemp cultivation and its seed-based food products. Front Environ Sci 12.
835 https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1342330
836 Muylle, H., van Hulle, S., de Vliegher, A., Baert, J., van Bockstaele, E., Roldán-Ruiz, I., 2015. Yield
837 and energy balance of annual and perennial lignocellulosic crops for bio-refinery use: A 4-year
838 field experiment in Belgium. European Journal of Agronomy 63, 62–70.
839 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.001
840 Nazari, F., Woods, L.D., 2025. Environmental life cycle assessment of hemp-based thermal insulation:
841 From agricultural growth to manufacturing in the United States. J Clean Prod 506, 145509.
842 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145509
843 Neeft J, Gagnepain B, Bacovsky D, Lauranson R, Georgakopoulos K, Fehrenback H, et al.
844 Harmonized calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe, Netherlands. 2011
845 BioGrace standard values – version 4 – Public.xls, www.BioGrace.net.
846 Pan, J., Xu, G., Liang, M., Mo, H., Luo, D., Wang, C., Ullah, R., Li, Y., Liao, C., Wei, X., Chen, P.,
847 2025. Kenaf biochar enhances heavy metal phytostabilization and growth of industrial hemp
848 (*Cannabis sativa* L.) using multi-metal contaminated mining site soils. Plant Physiology and
849 Biochemistry 229. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110312
850 Prade, T., Svensson, S.E., Andersson, A., Mattsson, J.E., 2011. Biomass and energy yield of industrial
851 hemp grown for biogas and solid fuel. Biomass Bioenergy 35, 3040–3049.
852 https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.006
853 Prade, T., Svensson, S.-E., Mattsson, J.E., 2012. Energy balances for biogas and solid biofuel
854 production from industrial hemp. Biomass Bioenergy 40, 36–52.
855 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.045
856 Reinhardt, J., Hilgert, P., von Cossel, M., 2022. Yield performance of dedicated industrial crops on
857 low-temperature characterized marginal agricultural land in Europe – a review. Biofuels,
858 Bioproducts and Biorefining. https://doi.org/10.1002/bbb.2314

859 Romaneckas, K., Švereikaitė, A., Kimbirauskienė, R., Sinkevičienė, A., Balandaitė, J., 2023. The
860 Energy and Environmental Evaluation of Maize, Hemp and Faba Bean Multi-Crops. Agronomy
861 13. https://doi.org/10.3390/agronomy13092316
862 Senga Kiessé, T., Ventura, A., van der Werf, H.M.G., Cazacliu, B., Idir, R., Andrianandraina, 2017.
863 Introducing economic actors and their possibilities for action in LCA using sensitivity analysis:
864 Application to hemp-based insulation products for building applications. J Clean Prod 142,
865 3905–3916. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.069
866 Szeptycki A, Wójcicki Z. Technical development and energy inputs in agriculture till 2020. 2003
867 Warszawa, IBMER (in Polish).
868 Šiaudinis, G., Jasinskas, A., Šlepetienė, A., Karčauskienė, D., 2012. The evaluation of biomass and
869 energy productivity of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) and cup plant (*Silphium*
870 *perfoliatum* L.) in Albeluvisol 99, 357–362.
871 Siaudinis G, Karcauskiene D. The effect of sewage sludge on and cup plant's (*Silphium perfoliatum*
872 L.) biomass productivity under Western Lithuania's retisol. Proceedings of the 8th International
873 Scientific Conference Rural Development. Bioeconomy challenges 2017:148–52.
874 https://doi.org/10.15544/RD.2017.027.
875 Sieracka, D., Frankowski, J., Wacławek, S., Czekała, W., 2023. Hemp Biomass as a Raw Material for
876 Sustainable Development. Applied Sciences (Switzerland). https://doi.org/10.3390/app13179733
877 Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., 2024. Energy efficiency of *Silphium perfoliatum* and
878 *Helianthus salicifolius* biomass production. Energy 307.
879 https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132592
880 Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., 2025. Energy efficiency of spring
881 camelina production under an organic system in sole-cropping and intercropping cultivation. Ind
882 Crops Prod 228. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120909
883 Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Tworkowski, J., Szczukowski, S., Niksa, D., 2016. Analysis of the
884 energy efficiency of short rotation woody crops biomass as affected by different methods of soil
885 enrichment. Energy 113, 748–761. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.098

886 Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworkowski, J., Szczukowski, S., Olba–Zięty, E.,
887 Gołaszewski, J., 2017. Energy efficiency of perennial herbaceous crops production depending on
888 the type of digestate and mineral fertilizers. Energy 134, 50–60.
889 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.195
890 Sunoj Valiaparambil Sebastian, J., Dong, X., Trostle, C., Pham, H., Joshi, M. v., Jessup, R.W., Burow,
891 M.D., Provin, T.L., 2023. Hemp Agronomy: Current Advances, Questions, Challenges, and
892 Opportunities. Agronomy. https://doi.org/10.3390/agronomy13020475
893 Tang, K., Wang, J., Yang, Y., Deng, G., Yu, J., Hu, W., Guo, L., Du, G., Liu, F., 2022. Fiber hemp
894 (*Cannabis sativa* L.) yield and its response to fertilization and planting density in China. Ind
895 Crops Prod 177, 114542. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114542
896 Teirumnieka, E., Patel, N., Laktuka, K., Dolge, K., Veidenbergs, I., Blumberga, D., 2023.
897 Sustainability dilemma of hemp utilization for energy production. Energy Nexus 11.
898 https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100213
899 Todde, G., Carboni, G., Marras, S., Caria, M., Sirca, C., 2022. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.)
900 for phytoremediation: Energy and environmental life cycle assessment of using contaminated
901 biomass as an energy resource. Sustainable Energy Technologies and Assessments 52.
902 https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102081
903 Vávrová, K., Solcova, O., Knápek, J., Weger, J., Soukup, K., Humešová, T., Králík, T., Bím, J., 2022.
904 Economic evaluation of Hemp's (*Cannabis sativa*) residual biomass for production of direct
905 energy or biochar. Fuel 329, 125435. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125435
906 Visković, J., Zheljazkov, V.D., Sikora, V., Noller, J., Latković, D., Ocamb, C.M., Koren, A., 2023.
907 Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Agronomy and Utilization: A Review. Agronomy.
908 https://doi.org/10.3390/agronomy13030931