UNIWERSYTET WARMIŃSKO-MAZURSKI
W OLSZTYNIE
WYDZIAŁ ROLNICTWA I LEŚNICTWA

mgr Paweł Stachowicz

PRODUKCJA I POZYSKANIE BIOMASY LIGNOCELULOZOWEJ ORAZ WYTWARZANIE Z NIEJ PELETU

Rozprawa doktorska wykonana
w Katedrze Genetyki, Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców
pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mariusza Jerzego Stolarskiego
oraz w Przedsiębiorstwie Quercus sp. z o.o. z Pasymia
pod kierunkiem dr inż. Waldemara Sieniawskiego

Olsztyn 2023

UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY
IN OLSZTYN
FACULTY OF AGRICULTURE AND FORESTRY

mgr Paweł Stachowicz

LIGNOCELLULOSIC BIOMASS PRODUCTION, HARVESTING AND PELLETIZATION

Doctorate thesis carried out
in the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering
under the supervision of prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzy Stolarski
and in the Quercus Company from Pasym
under the supervision of dr inż. Waldemar Sieniawski

Olsztyn 2023

Spis treści

Lista publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej……6
Streszczenie……7
Abstract……..10
1. Wprowadzenie……13
2. Przedmiot badań, hipotezy badawcze oraz cele rozprawy doktorskiej……..18
3. Materiały i metody…… 20
3.1. Doświadczenie polowe……20
3.2. Charakterystyka roślin oraz plon i wartość energetyczna biomasy…….22
3.3. Produkcja peletu……...24
3.4. Badania laboratoryjne……..28
3.5. Porównanie właściwości peletu do wybranych norm jakościowych……29
3.6. Analiza kosztów i energochłonności produkcji peletu…….29
3.7. Analiza statystyczna…….31
4. Wyniki badań i dyskusja…….33
4.1. Warunki klimatyczne……33
4.2. Liczba roślin, przeżywalność i cechy biometryczne……34
4.3. Plon biomasy SRWC i jego wartość energetyczna……...38
4.4. Jakość dendromasy SRWC……..49
4.5. Właściwości peletu z mieszanin biomasy rolniczej i leśnej…….55
4.6. Koszty produkcji peletu……...66
4.7. Energochłonność i wybrane wskaźniki efektywności produkcji peletu……..70
4.8. Praktyczne znaczenie uzyskanych wyników……76
5. Wnioski…….……..85
6. Powiązanie badań z działalnością przedsiębiorstwa……...89
7. Literatura…….……92
8. Oświadczenia współautorów……102
9. Załączniki…….……...104
9.1. Publikacja P1……104
9.2. Publikacja P2……118
9.3. Publikacja P3……134
9.4. Publikacja P4……161

Finansowanie

Badania współfinansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach III edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy”, nr umowy DWD/3/19/2019.

Badania wykonano w ramach wieloletnich badań realizowanych w Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, Wydział Rolnictwa i Leśnictwa, Katedra Genetyki, Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców, nr tematu 30.610.007-110.

Badania współfinansowane przez Quercus sp. z o.o. w ramach działalności badawczo-rozwojowej.

Podziękowania

Pragnę podziękować pracownikom Katedry Genetyki, Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców, pracownikom przedsiębiorstwa Quercus sp. z o.o. w Pasymiu, a także wszystkim innym osobom zaangażowanym w realizację badań, nadzór merytoryczny oraz wsparcie

a w szczególności:

Panu promotorowi prof. dr hab. inż. Mariuszowi Jerzemu Stolarskiemu za trud włożony w prowadzenie mnie ścieżką doktoranta, nieocenioną pomoc udzieloną podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej i krytyczne podejście przy redagowaniu pracy, a także za wyrozumiałość, cierpliwość oraz motywację do terminowej realizacji założeń badawczych.

Panu opiekunowi pomocniczemu dr inż. Waldemarowi Sieniawskiemu za opiekę i wsparcie merytoryczne oraz umożliwienie pogodzenia pracy zawodowej z obowiązkami akademickimi.

Pragnę również podziękować rodzinie oraz przyjaciołom, bez których praca ta mogłaby nie powstać, za nieustanne wsparcie podczas tych wszystkich lat edukacji oraz motywację do konsekwentnego realizowania postawionych sobie celów.

Lista publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska oparta jest na cyklu czterech publikacji skupiających się wokół wspólnego tytułu „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz wytwarzanie z niej peletu".

Trzy pierwsze prace zostały opublikowane:

P1. Stolarski M.J., **Stachowicz P.** 2023. Black locust, poplar or willow? Yield and energy value in three consecutive four-year harvest rotations. Industrial Crops and Products, 193, 116197, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116197. Wskaźnik Impact Factor – **IF: 6.449**. Punktacja Ministerstwa Edukacji i Nauki: **200 pkt**.

P2. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Thermophysical properties and elemental composition of black locust, poplar and willow biomass. Energies, 16, 305. https://doi.org/10.3390/en16010305. Wskaźnik Impact Factor – **IF: 3.252.** Punktacja Ministerstwa Edukacji i Nauki: **140 pkt**.

P3. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Short rotation woody crops and forest biomass sawdust mixture pellet quality. Industrial Crops and Products, 197, 116604, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116604. Wskaźnik Impact Factor – **IF: 6.449**. Punktacja Ministerstwa Edukacji i Nauki: **200 pkt**.

P4. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Pellets from mixtures of short rotation woody crops with forest-derived biomass: Production costs and energy intensity.

Tytuł czwartej publikacji to tytuł roboczy i może na ulec modyfikacji ze względu na ewentualne poprawki po uwagach i sugestiach recenzentów oraz edytora czasopisma, gdyż w momencie składania niniejszej rozprawy doktorskiej była ona na etapie recenzji w czasopiśmie Renewable Energy (IF: 8.634; 140 pkt). Dla ujednolicenia nazewnictwa manuskrypt ten w dalszej części rozprawy doktorskiej opisywano jako **P4**.

Wszystkie cztery publikacje stanowią integralną całość składającą się na niniejszą rozprawę doktorską, dlatego zostały w niej zamieszczone. Przy czym w przypadku czwartej publikacji (**P4**) załączono tylko elementy potwierdzające jej wysłanie do redakcji czasopisma oraz informację, że na etapie przygotowywania tej rozprawy była ona na etapie recenzji.

Streszczenie

Skomplikowana sytuacja polityczno-gospodarcza oraz gwałtowane wzrosty i fluktuacje cen kopalnych surowców energetycznych oraz ograniczenia w ich dostępności i problemy środowiskowe powodują, że odnawialne źródła energii (OZE) będą odgrywały strategiczną rolę w dostarczeniu energii. Biomasa to obecnie główne OZE w Polsce, jak również w Unii Europejskiej (UE). Biomasa stała na cele energetyczne pochodzi głównie z lasów, z przemysłu przetwórstwa drzewnego oraz z rolnictwa. Istotnym źródłem tego surowca energetycznego pochodzenia rolniczego są również wieloletnie rośliny energetyczne dające biomasę w postaci drewna, z j. ang. „short rotation woody crops (SRWC)", a wśród nich robinia akacjowa, topola i wierzba. Uprawa i produkcja biomasy SRWC oraz ocena jej jakości jako surowca energetycznego to ciągle aktualne zagadnienie w wielu krajach Europy jak również w USA i Kanadzie. Jednakże trzeba dodać, że biomasa drzewna, pochodzenia leśnego jak również rolniczego z upraw SRWC zarówno w formie pierwotnej oraz w formie pozostałości poprodukcyjnych jest niejednorodnym biopaliwem i dlatego jest ona czasami mało atrakcyjna. Ograniczenia te można znacznie zniwelować poprzez jej peletyzację, dzięki czemu wyprodukowane biopaliwo stałe w postaci peletu jest bardziej atrakcyjne i korzystne do generowania energii. Światowa produkcja peletu systematycznie rośnie i w 2021 r. była wyższa o około 6,8% w porównaniu do 2020 r., a w UE był to wzrost o około 9%. W związku z tym rośnie zapotrzebowanie na trociny pochodzenia drzewnego, ich dostępność staje się coraz bardziej ograniczona, a ceny wzrastają co z kolei powoduje wzrost kosztów produkcji peletu. Dlatego też w celu zaspokojenia potrzeb surowcowych konieczne może być też stosowanie do produkcji peletu biomasy drzewnej SRWC.

Podstawą niniejszej rozprawy doktorskiej były wyniki badań polowych produkcji biomasy SRWC w ramach badań Katedry Genetyki Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców (KGHRiIB) Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM). Ponadto analizy laboratoryjne jakości biosurowców oraz badania produkcji peletu z biomasy pochodzenia rolniczego, leśnego oraz ich mieszanin, w połączeniu z oceną kosztów i nakładów energetycznych związanych z ich produkcją.

Głównym celem badań była ocena plonowania i przydatności biomasy trzech gatunków SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) pozyskanej w krótkich rotacjach zbioru do produkcji peletu w mieszaninach z trocinami pochodzenia leśnego (sosna, brzoza). Natomiast cele szczegółowe obejmowały określenie: **1.** Wpływu: (i) gatunku, (ii) sposobu wzbogacania gleby, (iii) rotacji zbioru na cechy morfologiczne, przeżywalność, plonowanie i wartość

energetyczną plonu biomasy SRWC przez okres kolejnych 12 lat uprawy. **2.** Właściwości termofizycznych i składu elementarnego biomasy SRWC w zależności od wyżej wymienionych czynników. **3.** Właściwości termofizycznych i składu elementarnego peletu wyprodukowanego z biomasy leśnej (sosny, brzozy) i rolniczej SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) oraz z ich mieszanin. Ponadto wykazanie, które rodzaje peletu spełniały parametry określone w wybranych normach kategoryzujących pelet do różnych klas. **4.** Kosztów i energochłonności produkcji peletów z biomasy leśnej i rolniczej SRWC oraz z ich mieszanin w różnych udziałach wagowych.

Spośród badanych trzech gatunków SRWC topola była najbardziej stabilna pod względem przeżywalności roślin (średnio 90,3%) oraz wykształcała istotnie wyższe rośliny (średnio 7,09 m) o grubszych pędach (średnio 51,7 mm) w porównaniu do wierzby i robinii akacjowej. Dlatego topola charakteryzowała się najwyższym plonem suchej masy (średnio 9,1 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) oraz średnią wartością energetyczną plonu. Natomiast plon wierzby i robinii akacjowej był niższy średnio o odpowiednio 6,5% i 47,5%. Zastosowane sposoby wzbogacenia gleby generalnie wpłynęły pozytywnie na wzrost i rozwój SRWC, a tym samym na plon biomasy i jego wartość energetyczną w porównaniu do obiektów kontrolnych. Najlepsze efekty uzyskano w wariantach, w których elementem wzbogacenia gleby była lignina, słabsze natomiast było oddziaływanie samego nawożenia mineralnego, zastosowanie szczepionki mikoryzowej oraz jednoczesne zastosowanie tych dwóch czynników.

Gatunek SRWC w największym stopniu determinował wilgotność biomasy, zawartość popiołu, azotu, ciepło spalania i wartość opałową. Natomiast rotacja zbioru w dużym stopniu wpływała na zawartość węgla, wodoru i chloru w biomasie. Robinia akacjowa charakteryzowała się średnio najniższą wilgotnością (38,89%) i najwyższą wartością opałową (10,25 GJ Mg^{-1}), zawartością siarki (0,033% s.m.), azotu (0,91% s.m) i chloru (0,032% s.m.). Topola charakteryzowała się średnio najwyższą wartością ciepła spalania (19,84 GJ Mg^{-1} s.m.), wilgotnością (56,52%), zawartością węgla (53,46% s.m.) i popiołu (1,67% s.m.). Natomiast wierzba charakteryzowała się średnio najniższą zawartością popiołu (1,25% s.m.), azotu (0,38% s.m.) i chloru (0,19% s.m.) oraz pośrednią wilgotnością.

Potwierdzono możliwość i zasadność produkcji peletu z mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego oraz z plantacji SRWC. Stwierdzono, że nie tylko pelety z trocin pochodzenia leśnego (sosny i brzozy) charakteryzowały się korzystnymi właściwościami termofizycznymi i składem elementarnym, ale również dodatek biomasy SRWC (wierzby, topoli i robinii akacjowej) do tych trocin umożliwiał uzyskanie peletów, które w większości parametrów spełniały wymagania norm jakościowych dla peletów ISO, PFI i KRFI. Trzeba

jednak podkreślić, że jakość uzyskanego peletu z mieszaniny biomasy pogarszała się (głównie w odniesieniu do wzrostu zwartości popiołu, azotu, siarki czy chloru) wraz ze wzrostem udziału biomasy SRWC w stosunku do czystych trocin z gatunków leśnych. Ze względu na różnorodność i zmienność biomasy SRWC od biomasy pochodzenia leśnego, należy wskazać, że dodatek 25% biomasy wierzby lub topoli do trocin sosnowych pozwalał zachować badane cechy wyprodukowanego peletu na najwyższym poziomie wskazywanym przez normy jakościowe. Dlatego też w odniesieniu wyłącznie do klasy A1 według normy ISO i klasy Grade 1 według normy KFRI w całości spełniały je trzy rodzaje peletów: (i) sosnowy; (ii) z mieszaniny sosny 75% i wierzby 25% – SP75+W25; (iii) z mieszaniny sosny 75% i topoli 25% – SP75+P25.

Najniższe koszty (339,7 € Mg^{-1}) i nakłady energetyczne (1448 kWh Mg^{-1}) produkcji peletu stwierdzono w przypadku trocin sosny. Koszty produkcji peletu z topoli i wierzby były wyższe w zakresie odpowiednio 5-6%, a z robinii akacjowej o 8,5% w porównaniu do peletu sosnowego. Natomiast nakłady energetyczne produkcji peletu z wierzby, robinii akacjowej i topoli były wyższe o 48,1; 50,4 i 53,2%. W strukturze kosztów i nakładów energetycznych produkcji peletów zdecydowanie największy udział stanowiły odpowiednio, koszty zakupu surowców (50,3–57,8%) i nakłady energetyczne na ich suszenie (74,6–82,6%). Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z trocin sosny i brzozy (3,3–3,5) był wyższy niż w przypadku SRWC (ok. 2,2). Tym nie mniej wykazano, że dodatek 25% biomasy SRWC do trocin umożliwiał uzyskanie peletów, dla których wskaźnik efektywności energetycznej przekroczył wartość 3,0. Zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do trocin sosny i brzozy powodowało wzrost kosztów i energochłonności oraz spadek wskaźników efektywności energetycznej produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. Mimo tego należy uznać, że biomasa SRWC może być uwzględniania w produkcji peletu w mieszaninach z biomasą drzewną pochodzenia leśnego, ponieważ jest to ważne zarówno z punktu widzenia producentów jak i użytkowników końcowych peletu, szczególnie w sytuacji dynamicznych zmian na rynku surowców energetycznych i gdy na rynku mogą występować niedobory surowca w postaci trocin pochodzenia leśnego.

Słowa kluczowe: Robinia akacjowa; Topola; Wierzba; Sosna; Brzoza; Biomasa drzewna; Dendromasa, Plon biomasy; Rotacja zbioru; Wartość energetyczna plonu; Właściwości termofizyczne; Skład elementarny; Wilgotność, Zawartość popiołu; Wartość opałowa; Pelet wierzbowy; Pelet sosnowy; Pelet rolniczy; Pelet leśny; Pelet z mieszaniny biomasy; Koszty produkcji peletu; Energochłonność produkcji peletu, Efektywność produkcji peletu

Abstract

Due to the current complicated political and economic situation, rapid fluctuations of fossil fuel prices and limitations of their availability as well as environmental issues, renewable energy sources (RES) will play a strategic role in energy supply. Biomass is the main type of RES in Poland and in the European Union (EU). Solid biomass used for energy generation is derived mainly from forests, the wood industry and agriculture. Moreover, perennial energy crops providing woody biomass (short rotation woody crops – SRWC), including black locust, poplar and willow, are an important source of this energy feedstock. SRWC biomass cultivation and production and an assessment of its quality as an energy feedstock is still a topical issue in many European countries as well as in the USA and in Canada. However, woody biomass derived from forests and from SRWC plantations, both in the primary form and as production waste, is a non-homogeneous fuel, which sometimes makes it a product of low attractiveness. Pelletization can substantially overcome these limitations, making solid biofuel in the form of pellets a more appealing and effective energy feedstock.

Global production of pellets has been growing steadily, increasing in 2021 by approximately 6.8% compared with 2020, with production in the EU increasing by 9%. In consequence, the demand for sawdust is growing while its availability is increasingly limited, and the prices are increasing, which, in turn, entails an increase in pellet production cost. This is why woody biomass from short-rotation woody crops (SRWC) may have to be used in pellet production to satisfy the demand for the raw material.

This doctoral dissertation is based on the findings of a field study of SRWC biomass production as part of the research conducted at the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering, University of Warmia and Mazury in Olsztyn (UWM). Moreover, laboratory analyses of biofeedstock quality and studies of pellet production from agriculture-, forest-derived biomass and their mixtures were used in connection with an analysis of the costs and financial outlays for their production.

The main objective of the study was to evaluate the yield and usability of biomass derived from three SRWC species (black locust, poplar and willow) obtained in short harvest rotations for pellet production in mixtures with sawdust from forest trees (pine, birch). The specific objectives included the determination of **1.** The impact of (i) the species, (ii) soil enrichment method, and (iii) harvest rotation on the morphological features, survivability, yield and energy value of SRWC biomass during the 12 consecutive years of the cultivation. **2.** Thermophysical characteristics and elemental composition of SRWC biomass depending on

the factors mentioned above. **3.** Thermophysical characteristics and elemental composition of pellet produced from forest-derived biomass (pine, birch) and cultivated SRWC (black locust, poplar and willow) and from their mixtures. Moreover, the objective was to demonstrate which types of pellets met the parameters laid down in selected standards which categorize pellets into various classes. **4.** The cost and energy intensity of pellet production from forest wood and cultivated SRWC biomass and from their mixtures in various proportions (w/w).

Among the three SRWC species, poplar was the most stable with respect to plant survivability (mean 90.3%), and its plants were significantly taller (mean 7.09 m), with thicker shoots (mean 51.7 mm) than willow or black locust. Therefore, poplar produced a higher dry matter yield (mean 9.1 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ d.m.) and had a higher mean yield energy value. The yield of willow and black locust was lower by 6.5% and 47.5%, respectively. In general, the soil enrichment method applied in the study had a positive effect on the SRWC growth and, in consequence, on the biomass yield and its energy value compared with the control objects. The best effects were achieved in the variants with lignin used as one of the enriching agents, while the application of mineral fertilization or mycorrhizal inoculum alone and a combination of the two gave poorer results.

The SRWC species had the greatest impact on the biomass moisture, ash and nitrogen content, higher and lower heating value. The harvest rotation largely determined the biomass carbon, hydrogen and chlorine content. Black locust had the lowest moisture content (38.89%) and the highest lower heating value (10.25 GJ Mg^{-1}), sulfur (0.033% d.m.), nitrogen (0.91% d.m.) and chlorine (0.032% d.m.) content. Poplar had the highest mean higher heating value (19.84 GJ Mg^{-1} d.m.), moisture (56.52%), carbon (53.46% d.m.) and ash (1.67% d.m.) content. Willow had the lowest mean ash (1.25% d.m.), nitrogen (0.38% d.m.) and chlorine (0.19% d.m.) content and average moisture content.

This study confirmed that the production of pellets from a mixture of biomass from forest-derived wood and from an SRWC plantation is possible and justified. It was found that not only pellets from forest-derived sawdust (pine and birch) had good thermophysical properties and elemental composition but also that the addition of SRWC biomass (willow, poplar, black locust) to the sawdust allowed for the production of pellets which mostly met the requirements of the quality standards for pellets: ISO, PFI and KRFI. However, the quality of the pellet from biomass mixtures deteriorated (mainly with respect to the ash, nitrogen, sulfur and chlorine content) with an increasing share of SRWC biomass relative to forest-derived wood sawdust.

Due to the variation and contrast between SRWC biomass and forest-derived biomass, an addition of 25% of willow or poplar biomass to pine sawdust helped to maintain the quality features of the produced pellet at the highest level laid down in the quality standards. Referring solely to class A1 under ISO and Grade 1 according to KFRI, three types of pellets meet the criteria: (i) those made from pine wood, (ii) a combination of 75% pine and 25% willow (SP75+W25), and (iii) a combination of 75% pine and 25% poplar (SP75+P25).

The lowest cost (339.7 € Mg^{-1}) and energy input (1448 kWh Mg^{-1}) were determined for pellets produced from pine sawdust. The cost of pellet production from poplar and willow was 5-6% higher, respectively, and from black locust (by 8.5%) compared with pellet from pine. The energy input for pellet production from willow, black locust and poplar was higher by 48.1%, 50.4% and 53.2%, respectively. The cost of feedstock purchase (50.3–57.8%) and of the energy input for drying it (74.6–82.6%) accounted for definitely the largest portion of the costs and energy input. The energy efficiency index for pellet production from pine and birch sawdust (3.3–3.5) was higher than for SRWC (approximately 2.2). Nevertheless, an addition of 25% of SRWC biomass to sawdust was shown to help to produce pellets with an energy efficiency index exceeding 3.0. An increase in the share of SRWC biomass from 25% through 50% to 75% relative to pine and birch sawdust resulted in a cost and energy intensity increase and in the energy efficiency decrease for the pellets produced from those mixtures. Despite this, SRWC biomass can be included in the process of pellet production in mixtures with forest-derived woody biomass, as it is important for both pellet producers and end-users, especially given the rapid changes in the energy feedstock market and possible forest wood sawdust shortage.

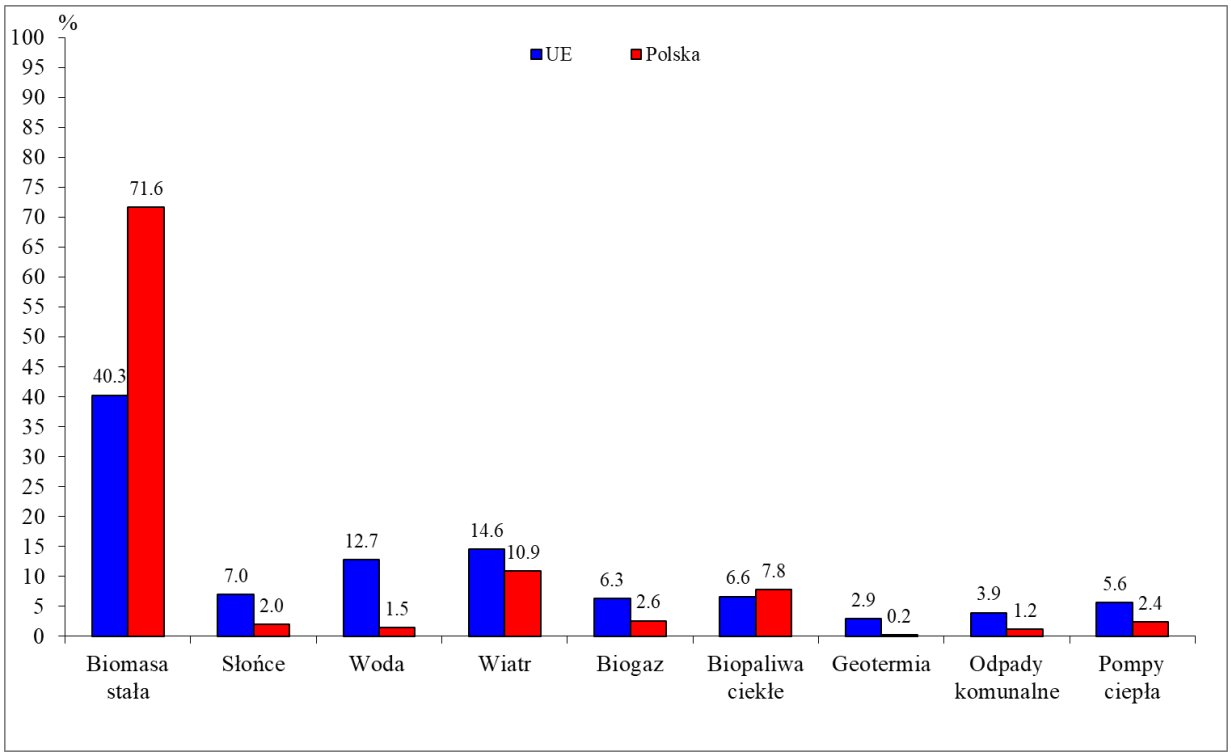
Keywords: Black locust; Poplar; Willow; Pine; Birch; Woody biomass; Dendromass, Biomass yield; Harvest rotation; Energy value of yield; Thermophysical characteristics; Elemental composition; Moisture content; Ash content; Lower heating value; Willow pellet; Pine pellet; Agricultural pellet; Forest pellet; Pellet produced from biomass mixture; Pellet production costs; Energy intensity of pellet production; Efficiency of pellet production

1. Wprowadzenie

Unia Europejska (UE) importuje prawie trzy piąte całej potrzebnej jej energii, co oznacza, że średni wskaźnik zależności energetycznej UE od zewnętrznych dostawców surowców energetycznych w 2020 r. wynosił 57,5%. Jest to bardzo niekorzystna sytuacja, szczególnie przy uwzględnieniu obecnej sytuacji polityczno-gospodarczej. Trzeba podkreślić, że żadne z państw członkowskich UE nie było samowystarczalne w zakresie swoich potrzeb energetycznych. Również w Polsce wskaźnik zależności energetycznej od dostaw zewnętrznych surowców energetycznych bardzo szybko wzrasta, ponieważ w 2020 r. wynosił 42,8%, podczas gdy jeszcze w 1995 r. Polska była samowystarczalna pod tym względem (Eurostat 2022a). W związku z powyższym jednym z podstawowych priorytetów dla UE jest zwiększanie uniezależnienia się od dostaw zewnętrznych surowców energetycznych. Jednym z rozwiązań, na które stawia UE jest zwiększanie wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE). Ponadto obecna skomplikowana sytuacja polityczno-gospodarcza oraz gwałtowane wzrosty i fluktuacje cen kopalnych surowców energetycznych, a także ograniczenia w ich dostępności powodują, że OZE będą odgrywały strategiczną rolę w dostarczeniu energii. Podkreśla się również, że przy negatywnym wpływie paliw kopalnych na środowisko, to właśnie OZE stanowią kluczową rolę w erze po paliwach kopalnych (Caineng i in. 2016; Ahmad i Zhang 2020). Dlatego też już w 2009 r. określono cele dla całej UE w zakresie udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto na średnim poziomie 20%, przy czym państwa członkowskie deklarowały różne poziomy tego wskaźnika (Directive 2009/28/EC). Następnie w 2018 r. UE wytyczyła nowe ramy regulacyjne, które obejmują między innymi wiążący cel w zakresie energii ze źródeł odnawialnych w 2030 r. na poziomie 32% z klauzulą rewizji w górę (Directive 2018/2001/UE). Trzeba podkreślić, że UE osiągnęła wytyczone wcześniej cele, ponieważ w 2020 r. średnio 22,1% końcowego zużycia energii brutto pochodziło z OZE, podczas gdy w 2005 r, było to 10,2% (European Commission 2022). Spośród państw członkowskich UE liderem w tym zakresie była Szwecja, w której 60,1% końcowego zużycia energii pochodziło z OZE. Z kolei w Polsce udział OZE w końcowym zużyciu energii w 2020 r. wynosił 16,1%. Trzeba tu dodać, że Polska od 2018 r. zrewidowała swoje dane dotyczące końcowego zużycia energii z biomasy stałej i dlatego udział OZE wzrósł o ponad 3 punkty procentowe (pp.) w porównaniu do poprzednich lat, co z kolei pozwoliło Polsce osiągnąć zakładany cel 15% na 2020 r. (Eurostat 2022b).

W związku z powyższym wszystkie rodzaje OZE (słońce, woda, wiatr, geotermia, biomasa) są bardzo ważne w kontekście rozwoju nowoczesnych technologii i zwiększenia ich

udziału w strukturze pozyskiwania całej energii. Trzeba tu jednak podkreślić, że obecnie to właśnie biopaliwa stałe (w tym zrębki drzewne, brykiet i pelet) są ciągle najważniejszym źródłem energii w strukturze produkcji energii pierwotnej z OZE (rys. 1), ponieważ w 2020 r. stanowiły one średnio 40,1% w całej UE, a w Polsce było to aż 71,6% (GUS 2022).



Rysunek 1. Struktura pozyskania energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2020 r. (źródło: opracowanie własne na podstawie GUS 2022)

Obecnie biomasa stała na cele energetyczne pochodzi głównie z lasów, z przemysłu przetwórstwa drzewnego oraz z rolnictwa, w tym głownie z pozostałości poprodukcyjnych z produkcji zbóż i roślin oleistych oraz przemysłu rolno-spożywczego (Jankowski i in. 2020, 2022; Picchio i in. 2020). Natomiast ważnym źródłem biomasy mogą być również wieloletnie rośliny przemysłowe z j. ang. „perennial industrial crops (PIC)", a w tym wieloletnie rośliny energetyczne dające biomasę w postaci drewna, z j.ang. „short rotation woody crops (SRWC)" (Stolarski i in. 2013, 2016; Serapiglia i in. 2013; Manzone i in. 2014; Amaducci i in. 2017; Scordia i in. 2022). Biomasa drzewna SRWC w tym z robinii akacjowej, topoli, wierzby czy eukaliptusa jest surowcem dla różnych gałęzi przemysłu do produkcji bioproduktów oraz do generowania energii odnawialnej (Matyka i Radzikowski 2020; Warmiński i in. 2021). Z energetycznego punktu widzenia biomasa drzewna, w tym również SRWC, wykorzystana jest do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej oraz paliw transportowych drugiej generacji

(Monedero i in. 2015; Aghaalikhani i in. 2017; Nordborg i in. 2018; Stolarski i in. 2020). Trzeba jednak podkreślić, że każda technologia konwersji biomasy drzewnej wymaga stabilnych dostaw odpowiedniej jakości surowca. Biomasa drzewna uznana jest za dobry surowiec do konwersji termicznej i termochemicznej, aczkolwiek popiół i inne składniki mineralne mogą stwarzać problemy z powodu powstawania korozji, osadów i żużlu w instalacji. Z kolei w procesach konwersji biochemicznej popiół może obniżać skuteczność obróbki wstępnej biomasy. Dlatego też charakterystyka właściwości biomasy i określenie źródeł jej zmienności mają bardzo duże znaczenie praktyczne (Fabio i in. 2017). Jakość biomasy SRWC jest determinowana przez wiele czynników, a jednym z głównych jest rodzaj i gatunek rośliny, z której jest ona pozyskiwana. Inne ważne czynniki to warunki środowiskowe, rodzaj i poziom nawożenia roślin jak również w przypadku SRWC rotacja zbioru.

Podkreśla się również, że dzięki wieloletniemu charakterowi uprawy SRWC, możliwościom odrastania po kolejnych zbiorach, niskiemu zapotrzebowaniu na składniki pokarmowe i przy jednoczesnym ograniczeniu ilości zabiegów agrotechnicznych uprawy te przyczyniają się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i zwiększają magazynowanie węgla w glebie (Pacaldo i in. 2014; Krzyżaniak i in. 2019). Dlatego uznaje się, że uprawa i wykorzystanie SRWC przynosi korzyści ekonomiczne, gospodarcze, społeczne i środowiskowe (Amaducci i in. 2017; Ceotto i in. 2016; Castaño-Díaz i in. 2018). W związku z powyższym produkcja SRWC to ciągle aktualne zagadnienie w wielu krajach Europy (Aronsson i in. 2014; Larsen i in. 2014) jak również w USA i Kanadzie (Serapiglia i in. 2013; Labrecque i Teodorescu 2005). Ponadto coraz częściej zaleca się aby plantacje SRWC były zakładane głównie na gorszej jakości glebach marginalnych (za suche, za mokre, o złym położeniu w rozłogu gospodarstwa, zanieczyszczone, i inne), które są mało przydatne lub w ogóle nie nadają się do uprawy roślin konsumpcyjnych czy paszowych (Von Cossel i in. 2019). Dzięki takiemu podejściu można chociaż częściowo zmniejszyć konkurencję pomiędzy roślinami żywnościowymi, a energetycznymi i przemysłowymi. Pomimo, że plantacje SRWC zaleca się zakładać na glebach marginalnych to każdy rolnik uprawiający te rośliny chciałby uzyskać jak najwyższy plon biomasy, ponieważ jest to najbardziej kluczowy czynnik wpływający na końcową efektywność tego rodzaju produkcji. Plon biomasy SRWC jest oczywiście uzależniony od wielu czynników jak: gatunek, odmiana czy klon rośliny, warunki glebowe i klimatyczne (Tharakan i in. 2005; Serapiglia i in. 2013; Larsen i in. 2014), gęstość sadzenia, częstotliwość zbioru i zabiegi agrotechniczne (Wilkinson i in. 2007; Stolarski i in. 2019a). Kolejny ważny czynnik to rodzaj oraz wysokość dawki nawożenia roślin, szczególnie na słabych glebach (Aronsson i in. 2014; Sevel i in. 2014), chociaż nie zawsze te efekty są

znacząco pozytywne (Quaye i in. 2011). Do nawożenia PIC, w tym SRWC wykorzystuje się głównie nawożenie mineralne oraz organiczne obornikiem zwierzęcym, pofermentem z biogazowni czy osadami ściekowymi (Stolarski i in. 2017; Dubis i in. 2019; Jankowski i in. 2019; 2021; 2023). Niewiele jest natomiast informacji w zakresie wpływu innych sposobów wzbogacania gleby jak np. poprzez zastosowanie specjalnych szczepionek mikoryzowych czy ligniny jako pozostałości poprodukcyjnej przy produkcji papieru na plonowanie SRWC.

Trzeba również dodać, że biomasa drzewna, pochodzenia leśnego jak i rolniczego z upraw SRWC zarówno w formie pierwotnej (kłody, gałęzie, pędy, baloty, itp.) oraz w formie pozostałości poprodukcyjnych (np. trociny, wióry, zrębki) jest niejednorodnym biopaliwem i dlatego jest ona czasami mało atrakcyjna. Ograniczenia te można znacznie zniwelować poprzez peletyzację, dzięki czemu wyprodukowane biopaliwo stałe w postaci peletu jest bardziej korzystne do generowania energii (Picchio i in. 2020; Stolarski i in. 2020; 2022a; Acampora i in. 2021). Pelet to uznane, standaryzowane biopaliwo stałe, które ułatwia logistykę i obsługę zarówno dużych czy lokalnych ciepłowni czy elektrociepłowni, jak również małych indywidualnych kotłowni (Thomson i Liddell 2015; Cardozo i Malmquist 2019, Stolarski i in. 2020; Jasinskas i in. 2022). Zainteresowanie peletem jako lokalnym, odnawialnym i stosunkowo tańszym od paliw kopalnych źródłem energii wzrasta wśród konsumentów zarówno w sektorze mieszkaniowym jak i komercyjnym. Wynika to z obecnej sytuacji polityczno-gospodarczej i z obaw przed zakłóceniami w dostępności paliw kopalnych i wzrostu ich cen. Dlatego też światowa produkcja peletu systematycznie rośnie i w 2021 r. wzrosła o około 6,8% w porównaniu do 2020 roku, a w UE był to wzrost o około 9%. Polska obok Litwy i Kanady należała do krajów o największym wzroście produkcji peletu o odpowiednio 38%, 32% i 15%. W 2021 r. największym producentem peletu na świecie (ponad 9 000 000 t) były USA. Natomiast w UE-27 największym producentem peletu w 2021 r. były Niemcy (3 355 000 ton), a w Polsce produkcja ta wynosiła 1 800 000 ton (Bioenergy Europe 2022).

W związku z powyższym wzrasta zapotrzebowanie na surowce do produkcji peletu, który jest produkowany głównie z trocin i innych pozostałości drewna leśnego (Picchio i in. 2020; Garcia i in. 2018; Stolarski i in. 2022a). Ponadto wzrastają również koszty zakupu tych surowców, co z kolei powoduje wzrost całkowitych kosztów produkcji, a w efekcie cen końcowych peletu. Dlatego też poszukiwanie innych surowców do produkcji peletu jest ciągle aktualnym zagadnieniem. Wydaje się, że uzupełnieniem podaży biomasy drzewnej mogłyby być plantacje SRWC. Trzeba wziąć jednak po uwagę fakt, że biomasa SRWC jest produkowana na stosunkowo niewielkim areale (w porównaniu do powierzchni lasów i dostępności biomasy leśnej) dlatego też jej podaż byłaby ograniczona. W związku z tym można byłoby stosować

mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego, np. trocin z biomasą pochodzenia rolniczego SRWC. Takie rozwiązanie przyczyniłoby się do zwiększenia dostępności surowców do produkcji peletu i zmniejszyłoby chociażby częściowo zapotrzebowanie na surowce pochodzenia leśnego. Ponadto zwiększenie liczby źródeł podaży surowców do produkcji peletu to potencjalnie obniżenie lub stabilizacja i większa przewidywalność kosztów produkcji tego biopaliwa stałego, a w konsekwencji również jego cen sprzedaży. Dlatego też wykorzystanie różnorodnych zasobów biomasy (biomasa drzewna, półzdrewniała, zielona, słoma, pozostałości poprodukcyjne o wysokiej zawartości skrobi i oleju, różne odpady organiczne, dodatki nieorganiczne, itp.) o różnych właściwościach do peletyzacji jest obecnie istotnym tematem badawczym (Cui i in. 2021; Maj i in. 2022; Rashedi i in. 2022). Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że biomasa drzewna jest zróżnicowana pod względem właściwości, czego determinantami są gatunek rośliny, miejsce i sposób jej uprawy, logistyka i przygotowanie surowca (Gillespie i in. 2013, Stolarski i in. 2022a,b). Dlatego też tematyka oceny jakości peletu produkowanego z różnych substratów oraz ich mieszanin w sytuacji, gdy rośnie zapotrzebowanie na to biopaliwo stale jest ważne, zarówno z punktu widzenia podmiotów zajmujących się obrotem biomasy na rynku, producentów peletu i jego użytkowników końcowych (Thiffault i in. 2019). Pozwoli to bowiem zmniejszyć niepewność w zakresie wpływu używanych do produkcji surowców na jakość peletu i wynikające z tego spełnianie bądź niespełnienie standardów i norm rynkowych. W literaturze jest niewiele informacji w zakresie charakterystyki właściwości termofizycznych oraz chemicznych peletu wytwarzanego z mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego oraz rolniczego. Również informacje o kosztach i energochłonności produkcji peletu wytwarzanego z mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego oraz SRWC nie są zbyt powszechne.

2 Przedmiot badań, hipotezy badawcze oraz cele rozprawy doktorskiej

Przedmiotem badań w niniejszej rozprawie było doświadczenie polowe z trzema gatunkami SRWC (robinia akacjowa, topola, wierzba) uprawianymi i zbieranymi w kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru. Ponadto biomasa rolnicza pozyskana z tych trzech gatunków SRWC oraz biomasa pochodzenia leśnego (trociny sosnowe i trociny brzozowe) stanowiły przedmiot badań w zakresie produkcji peletu. Z kolei wyprodukowany pelet był przedmiotem badań w zakresie oceny jakości tego biopaliwa stałego oraz kosztów i nakładów energetycznych jego produkcji.

Problemy badawcze sformułowano w postaci pytań: W jakim stopniu gatunek i rotacja zbioru SRWC wpływają na plonowanie, właściwości termofizyczne i skład elementarny dendromasy oraz jak determinują możliwość jej dalszego wykorzystania do produkcji peletu w mieszaninach z biomasą pochodzenia leśnego? Jak zmienia się jakość peletu z biomasy SRWC i trocin pochodzenia leśnego oraz ich mieszanin? Jak kształtują się nakłady energetyczne oraz koszty produkcji peletu z biomasy SRWC, trocin pochodzenia leśnego i ich mieszanin?

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

- różnorodność gatunkowa SRWC będzie miała istotny wpływ na zróżnicowanie ich cech morfologicznych, plonowanie, właściwości termofizyczne i skład elementarny biomasy, a tym samym na wartość energetyczną zebranego plonu;
- biomasa SRWC to wartościowy surowiec, który z powodzeniem może być wykorzystywany do produkcji peletu w postaci czystej oraz w mieszaninach z trocinami z drewna leśnego;
- pelet uzyskany z trocin pochodzenia leśnego będzie charakteryzował się korzystniejszymi parametrami jako biopaliwo stałe w porównaniu do peletu z biomasy SRWC;
- nakłady energetyczne i koszty produkcji peletu z biomasy SRWC będą wyższe w porównaniu do tych wskaźników dla trocin z drewna pochodzenia leśnego;
- na podstawie uzyskanych wyników można będzie wskazać wariant/warianty mieszaniny wybranych rodzajów biomasy SRWC i leśnej, które umożliwią wyprodukowanie peletu o parametrach spełniających najwyższe wymagania jakościowe dla tego biopaliwa stałego stawiane przez wybrane normy międzynarodowe.

Powyższe hipotezy badawcze zweryfikowano na podstawie badań polowych, badań produkcji peletu, analiz laboratoryjnych oraz analiz nakładów energetycznych i kosztów produkcji peletu z biomasy SRWC pochodzenia rolniczego i trocin pochodzenia leśnego oraz ich mieszanin.

Dlatego głównym celem badań w ramach rozprawy doktorskiej była ocena plonowania i przydatności biomasy trzech gatunków SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) pozyskanej w krótkich rotacjach zbioru do produkcji peletu w mieszaninach z trocinami pochodzenia leśnego (sosna, brzoza). Natomiast cele szczegółowe obejmowały określenie:

- wpływu: (i) gatunku, (ii) sposobu wzbogacania gleby, (iii) rotacji zbioru na cechy morfologiczne, przeżywalność, plonowanie i wartość energetyczną plonu biomasy SRWC przez okres kolejnych 12 lat uprawy;
- właściwości termofizycznych i składu elementarnego biomasy SRWC w zależności od: (i) gatunku rośliny, (ii) sposobu wzbogacenia gleby, (iii) rotacji zbioru roślin w okresie kolejnych 12 lat uprawy. Ponadto ilościowe określenie względnego wkładu wymienionych czynników oraz ich interakcji w wyjaśnianie zmienności badanych cech biomasy;
- właściwości termofizycznych i składu elementarnego peletu wyprodukowanego z biomasy leśnej (sosny, brzozy) i rolniczej SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) oraz z ich mieszanin. Ponadto wykazanie, które rodzaje peletu spełniały parametry określone w wybranych normach kategoryzujących pelet do różnych klas;
- kosztów i energochłonności produkcji peletów z biomasy leśnej (sosny, brzozy) i rolniczej SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) oraz z ich mieszanin w różnych udziałach wagowych.

3. Materiały i metody

3.1. Doświadczenie polowe

Doświadczenie polowe założono wiosną w kwietniu 2010 roku w ramach badań Katedry Genetyki Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców (KGHRiIB) w północno-wschodniej Polsce (53°59′ N, 21°04′ E) na gruntach Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM). Glebę sklasyfikowano jako gleba rdzawa właściwa całkowita wytworzona z piasku luźnego. W jej poziomie próchnicznym (0-21 cm) występował piasek słabogliniasty. Podobnie było w poziomie wzbogacenia (21-41 cm), natomiast w poziomie skały macierzystej (41-150 cm) występował już piasek luźny. Zawartość części spławialnych w poszczególnych poziomach gleby była niska i nie przekraczała 6%. Odczyn gleby był obojętny do zasadowego (pHKCl 6,3-7,9). Gleba ta była również okresowo za sucha, a poziom wody gruntowej znajdował się znacznie poniżej 150 cm.

Pierwszym czynnikiem doświadczenia były trzy gatunki SRWC: wierzba (*Salix viminalis* L., obecnie odmiana Żubr, a wcześniej klon UWM 006), topola (*Populus nigra* x *P. Maximowiczii* Henry cv. Max-5) i robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia* L.). Wszystkie gatunki wysadzono w zagęszczeniu 11111 roślin na 1 ha. Zastosowano pasowy system sadzenia, w którym 2 rzędy w pasie rozmieszczono w odległości międzyrzędzia 0,75 m, następnie międzyrzędzie 1,50 m oddzielające kolejne 2 rzędy w pasie o międzyrzędziu 0,75 m, itd. Natomiast odległość roślin w rzędzie wynosiła 0,80 m. Całe doświadczenie zostało założone w trzech powtórzeniach i łącznie obejmowało 72 poletka. Czynnikiem drugim był sposób wzbogacenia gleby, w którym wyróżniono następujące warianty (obiekty): kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C); zastosowanie ligniny (L); nawożenie mineralne (F); zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M); lignina + nawożenie mineralne (LF); mikoryza + nawożenie mineralne (MF); lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF). W wynikach badań, w tabelach i na rysunkach w zakresie sposobów wzbogacenia gleby używano głównie skrótów podanych powyżej w nawiasach. Trzeba podkreślić, że w tym eksperymencie ligninę jako pozostałość po produkcji wyrobów papierniczych (13,3 Mg ha^{-1}) zastosowano tylko raz wiosną 2010 r. przed założeniem doświadczenia. Również żywą grzybnię mikoryzową oddzielnie dla każdego gatunku, zastosowano tylko raz w I dekadzie września 2010 r. W tym celu szczepionkę w postaci płynnej zawiesiny w ilości 30-35 cm^3 aplikowano pod każdą roślinę przy wykorzystaniu ręcznego aplikatora. Natomiast nawożenie mineralne (NPK) zastosowano trzykrotnie: przed rozpoczęciem drugiego okresu wegetacji (2011) pierwszej rotacji zbioru oraz wiosną 2014 i

2018 roku, odpowiednio na początku drugiej i trzeciej rotacji zbioru. Azot (90 kg ha^{-1} N) stosowano w postaci saletry amonowej, fosfor (30 kg ha^{-1} P_2O_5) w postaci superfosfatu potrójnego, a potas (60 kg ha^{-1} K_2O) w postaci soli potasowej. W pierwszym 2010 r., po wysadzeniu zrzezów wierzby i topoli zastosowano herbicyd doglebowy Guardian Complete MIX 664 SE w ilości 3,5 dm^3 ha^{-1}. W kolejnych latach nie stosowano żadnych herbicydów, ponadto w całym okresie 12 lat prowadzenia eksperymentu nie stosowano żadnych pestycydów przeciwko szkodnikom czy chorobom. Bardziej szczegółowe dane na temat właściwości gleby, przygotowania stanowiska, zakładania i prowadzenia tego doświadczenia opisano w pracy (Stolarski i in. 2015), w której przedstawiono wyniki z pierwszej rotacji zbioru. Natomiast w tej pracy prezentowane są wyniki z trzech kolejnych czteroletnich rotacji zbioru wykonanych w latach 2010-2021 (tab. 1). Dlatego też trzecim czynnikiem w tych badaniach była rotacja zbioru SRWC. Biomasa była zbierana w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru: pierwsza rotacja, podczas której rośliny rosły w latach 2010–2013, a ich zbiór wykonano w grudniu 2013 r.; druga rotacja, podczas której rośliny rosły w latach 2014–2017, a ich zbiór wykonano w grudniu 2017 r.; trzecia rotacja, podczas której rośliny rosły w latach 2018–2021, a ich zbiór wykonano w grudniu 2021 r. Należy dodać, że trzecia rotacja zbioru (*) była bezpośrednio analizowana w trakcie realizacji tej rozprawy doktorskiej, z której biomasa SRWC była wykorzystana do późniejszych testów produkcji peletu.

Tabela 1. Lata prowadzenia eksperymentu oraz zastosowane wzbogacenie gleby i kolejne czteroletnie rotacje zbioru roślin (źródło: opracowanie własne na podstawie danych KGHRiIB)

Rok uprawy	Rok kalendarzowy	Zastosowane wzbogacenie gleby	Rotacja zbioru
1	2010	Lignina i szczepionka mikoryzowa	
2	2011	Nawożenie mineralne	
3	2012		
4	2013		Pierwsza
5	2014	Nawożenie mineralne	
6	2015		
7	2016		
8	2017		Druga
9	2018	Nawożenie mineralne	
10	2019		
11	2020		
12	2021		Trzecia*

3.2. Charakterystyka roślin oraz plon i wartość energetyczna biomasy

Liczba roślin, przeżywalność i pomiary biometryczne

Po zakończeniu czwartego okresu wegetacji przed każdym zbiorem w pierwszej dekadzie grudnia 2013, 2017, 2021 r. liczono obsadę roślin na całych poletkach, a następnie przeliczono ją na powierzchnię jednego ha. Na tej podstawie określono przeżywalność roślin i wyrażono ją w procentach (%). Z cech biometrycznych określono liczbę pędów na karpie, średnicę pędu oraz wysokość roślin (fot. 1). Wszystkie te pomiary wykonywano w 10 powtórzeniach w środkowej części poletek. W przypadku liczby pędów uwzględniano żywe pędy o wysokości powyżej 1,5 m. Z kolei wysokość roślin (m) mierzono od powierzchni gleby do końca pędu, natomiast średnicę pędu (mm) mierzono na wysokości 0,5 m od powierzchni gleby.



Fotografia 1. Czteroletnie rośliny SRWC w czasie pomiarów biometrycznych, od lewej robinia akacjowa, topola i wierzba (źródło: fotografia własna z doświadczenia polowego KGHRiIB)

Plon biomasy i jego wartość energetyczna

Zbiór roślin w kolejnych czteroletnich rotacjach był wykonywany w grudniu 2013, 2017 i 2021. W tym okresie rośliny były pozbawione liści, tak więc w praktyce zbierano tylko pędy, czyli biomasę drzewną. Zbiór SRWC w kolejnych latach i rotacjach zbioru z poletek prowadzono ręcznie przy użyciu piły spalinowej (fot. 2). W celu określenia plonu biomasy ścinano całe rośliny na wysokości 5-10 cm nad powierzchnią gleby. Pozyskaną biomasę rośliny ważono wagą elektroniczną, określając plon świeżej biomasy z każdego poletka, a następnie na

tej podstawie określono plon świeżej biomasy z powierzchni jednego hektara (Mg ha^{-1}). Podczas zbioru z poszczególnych poletek pobierano reprezentatywne pędy do oznaczenia wilgotności biomasy. W tym celu po zważeniu biomasy z poletek rozdrabniano od 5 do 10 całych pędów rębakiem do drewna Junkkari HJ 10 G, napędzanym od wałka odbioru mocy ciągnika. Uzyskane zrębki były wymieszane, a następnie pobierano z nich reprezentatywne próby o masie około 5 kg. Próby te pakowano w worki foliowe (w celu uniknięcia naturalnego wysychania biomasy) i transportowano do Laboratorium Oceny Surowców Energetycznych KGHRiIB UWM.



Fotografia 2. Zbiór, ważenie i rozdrabnianie czteroletnich roślin SRWC na zrębki (źródło: fotografia własna z doświadczenia polowego KGHRiIB)

W celu określenia plonu suchej biomasy w laboratorium KGHRiIB UWM określono wilgotność biomasy (%) metodą suszarkowo-wagową (PN-EN ISO 18134-1:2015). Biomasę suszono do uzyskania stałej masy w temperaturze 105 °C. Następnie na podstawie wilgotności biomasy oraz plonu świeżej masy wyliczono plon suchej biomasy z powierzchni jednego ha (Mg ha^{-1} s.m.) oraz w przeliczeniu na jeden rok użytkowania plantacji (Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.). W celu określenia wartości energetycznej zebranej biomasy w laboratorium oznaczono również

zawartość wodoru (% s.m.) w piecu termograwimetrycznym Eltra Tga-Thermostep (PN-EN ISO 16948:2015-07) oraz ciepło spalania (GJ Mg^{-1} s.m.) w kalorymetrze IKA C2000 metodą dynamiczną. Dane te posłużyły do obliczenia wartości opałowej świeżej biomasy (GJ Mg^{-1}), według PN-EN ISO 18125:2017-07. Następnie na podstawie iloczynu wartości opałowej świeżej biomasy (GJ Mg^{-1}) oraz jej plonu (Mg ha^{-1}) obliczono wartość energetyczną plonu (GJ ha^{-1}) jak również przeliczono ją na jeden rok użytkowania plantacji (GJ ha^{-1} rok^{-1}). Ponadto obliczono całkowity plon suchej masy oraz całkowitą wartość energetyczną plonu z 12 lat uprawy dla badanych gatunków SRWC i kombinacji wzbogacenia gleby.

3.3. Produkcja peletu

Surowce użyte do produkcji peletu

Surowcem do produkcji peletu było pięć różnych rodzajów biomasy drzewnej, w tym dwa pochodzenia leśnego: Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.); Brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth) i trzy rodzaje biomasy pochodzenia rolniczego z plantacji SRWC: wierzba (*Salix viminalis* L., odmiana Żubr), topola (*Populus nigra* x P. *Maximowiczii* Henry cv. Max-5) i robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia* L.) (tab. 2). Biomasa leśna, jako pozostałości poprodukcyjne w postaci trocin powstałe po przecieraniu (przecinaniu) okorowanego drewna, pozyskano w styczniu 2022 r. z tartaku zlokalizowanego w północno-wschodniej Polsce. W związku z tym, że trociny były mokre to przed procesem peletyzacji były one suszone, a następnie domielone na młynku bijakowym z zastosowaniem sita o średnicy oczek 6 mm w celu ujednolicenia frakcji.

Biomasa rolnicza SRWC (robinia akacjowa, topola i wierzba), pochodziła z doświadczenia polowego zlokalizowanego również w północno-wschodniej Polsce. Biomasę SRWC stanowiły czteroletnie bezlistne całe pędy (kora i drewno) zebrane w grudniu 2021 r. po zakończeniu kolejnej trzeciej czteroletniej rotacji. Bezpośrednio po zbiorze całe pędy SRWC były rozdrabniane rębakiem do drewna Junkkari HJ 10 G. Uzyskane zrębki były transportowane do suszarni w celu ich termicznego wysuszenia. Po wysuszeniu zrębki były mielone w młynku bijakowym na sicie 12 mm, a następnie uzyskana frakcja była mielona na kolejnym młynku bijakowym na sicie 6 mm. W ten sposób uzyskano analogiczne frakcje biomasy pochodzenia leśnego i rolniczego, które następnie poddano peletyzacji w różnych wariantach. Wilgotność wszystkich rodzajów biomasy przed peletyzacją wynosiła około 7-8%, a więc była ona odpowiednia do przeprowadzenia testów produkcji peletu.

Łącznie wyprodukowano 23 rodzaje peletu, w tym dwa tylko z biomasy pochodzenia leśnego (sosna, brzoza), trzy tylko z biomasy pochodzenia rolniczego SRWC (robinia

akacjowa, topola, wierzba) i 18 z mieszaniny biomasy pochodzenia leśnego i rolniczego (tab. 2, fot. 3). Poszczególne mieszaniny formowano poprzez dodawanie do biomasy leśnej (sosna, brzoza) biomasy SRWC (robinia akacjowa, topola, wierzba) w następujących proporcjach wagowych (suchej masy): 25/75%, 50/50% lub 75/25%. Testy produkcji każdego rodzaju peletu prowadzono w trzech powtórzeniach, czyli łącznie przeprowadzono 69 testów. W jednym teście produkowano ok. 40 kg peletu, tak więc uzyskano po ok. 120 kg każdego rodzaju peletu, a w całym eksperymencie uzyskano łącznie ok. 2,8 Mg peletu.

Tabela 2. Rodzaje biomasy, gatunki roślin oraz ich mieszaniny wykorzystane do produkcji peletu (źródło: opracowanie własne)

Rodzaj biomasy	Gatunek rośliny	Wagowy udział gatunku (% suchej masy)	Kod peletu
Biomasa leśna	Scots pine (sosna)	100	SP
	Silver birch (brzoza)	100	SB
Biomasa rolnicza – SRWC	Black locust (robinia akacjowa)	100	BL
	Poplar (topola)	100	P
	Willow (wierzba)	100	W
Leśna + Rolnicza	Scots pine + Black locust	75 + 25	SP75+BL25
		50 + 50	SP50+BL50
		25 + 75	SP25+BL75
	Scots pine + Poplar	75 + 25	SP75+P25
		50 + 50	SP50+P50
		25 + 75	SP25+P75
	Scots pine + Willow	75 + 25	SP75+W25
		50 + 50	SP50+W50
		25 + 75	SP25+W75
	Silver birch + Black locust	75 + 25	SB75+BL25
		50 + 50	SB50+BL50
		25 + 75	SB25+BL75
	Silver birch + Poplar	75 + 25	SB75+P25
		50 + 50	SB50+P50
		25 + 75	SB25+P75
	Silver birch + Willow	75 + 25	SB75+W25
		50 + 50	SB50+W50
		25 + 75	SB25+W75



Fotografia 3. Pelety z biomasy leśnej (Scots pine – sosna, silver birch – brzoza) i rolniczej SRWC (black locust – robinia akacjowa, poplar – topola, willow – wierzba) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

Proces produkcji peletu prowadzono na granulatorze zasilanym silnikiem elektrycznym o mocy 30 kW o wydajności do 350 kg h^{-1} (fot. 4). Granulator ten był wyposażony w matrycę poziomą o długości 35 mm, a średnica otworów wynosiła 6 mm. Wybór matrycy wynikał z wcześniejszych testów, które wykazały, że był to najbardziej optymalny wybór dla badanych rodzajów biomasy. Każdy test prowadzono na gorącej, rozgrzanej matrycy. Biomasę zasypywano ręcznie do granulatora w sposób ciągły. Pomiędzy kolejnymi różnymi rodzajami biomasy, pozostawiono granulator w ciągłej pracy bez zasypywania surowca przez około 10 minut, w czasie których następowało oczyszczenie matrycy z poprzedniego rodzaju peletu. Ponadto po rozpoczęciu kolejnego testu z innym rodzajem biomasy odrzucano pierwszą partię wyprodukowanego peletu w celu wyeliminowania ewentualnego zanieczyszczenia z poprzednią biomasą, która mogła jeszcze zalegać w matrycy. Trzeba również dodać, że podczas testów produkcji peletu noże tnące znajdujące się za matrycą granulatora były celowo zdemontowane aby pelety odłamywały się z matrycy samoistnie. Ten zabieg miał na celu określenie zróżnicowania długości peletów wyprodukowanych z różnych rodzajów biomasy.

W trakcie testów produkcji z każdego powtórzenia dla danego rodzaju peletu pobierano po jednej próbie (po ok. 3–5 kg), czyli dla każdego rodzaju pobrano łącznie trzy próby peletu o łącznej masie ok. 9–15 kg. Każda wystudzona próba peletu była pakowana w worek foliowy, a następnie transportowana do laboratorium w celu oznaczenia właściwości termofizycznych i składu elementarnego.



Fotografia 4. Etapy procesu produkcji peletu z biomasy rolniczej SRWC i leśnej (źródło: opracowanie własne)

3.4. Badania laboratoryjne

W laboratorium w pierwszej kolejności wydzielono próby laboratoryjne (**P2, P3**) i oznaczano ich wilgotność w temperaturze 105°C metodą suszarkowo-wagową (PN-EN ISO 18134-1:2015). Próby były suszone w suszarce laboratoryjnej FD BINDER. Należy dodać, że w kolejnych rotacjach zbiór SRWC (**P1**), transport szczelnie zapakowanych zrębków oraz peletu (**P3**) i prace laboratoryjne były tak planowane aby wilgotność była oznaczana na drugi dzień po pozyskaniu prób, co eliminowało potencjalne straty wilgotności. Kolejnym etapem prac laboratoryjnych było mielenie suchych prób w młynku analitycznym (Retsch SM 200) z zastosowaniem sita 1 mm, dzięki czemu uzyskiwano jednolitą frakcję biomasy do dalszych analiz. Tak przygotowane próby biomasy były przechowywane w pojemnikach laboratoryjnych i sukcesywnie wykorzystywane do dalszych analiz (**P2, P3** i częściowo w **P1**).

Ciepło spalania biomasy oznaczono w bombie kalorymetrycznej kalorymetru IKA C2000 z wykorzystaniem metody dynamicznej. Trzeba tu dodać, że przed oznaczeniem ciepła spalania próby biomasy były ponownie umieszczane w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105°C i następnie pobierano z nich próbki analityczne, które to umieszczano w bombie kalorymetrycznej. Z kolei do oznaczenia zawartości popiołu w temperaturze 550˚C oraz zawartości części lotnych i węgla związanego w temperaturze 650˚C wykorzystano piec termograwimetryczny Eltra Tga-Thermostep (PN-EN ISO 18122:2016-01 i PN-EN ISO 18123:2016-01). Natomiast w automatycznym analizatorze Eltra CHS 500 oznaczono zawartość węgla (C), wodoru (H) i siarki (S) według PN-EN ISO 16948:2015-07 i PN-EN ISO 16994:2016-10. Zawartość azotu całkowitego (N) oznaczono metodą Kjeldahla przy użyciu mineralizatora K-435 oraz destylarki BUCHI B-324, a zawartość chloru (Cl) oznaczono zgodnie z normą PN-ISO 587:2000 przy użyciu mieszaniny Eschki. Wartość opałową obliczono na podstawie ciepła spalania, wilgotności i zawartości wodoru według PN-EN ISO 18125:2017-07. Wszystkie analizy laboratoryjne wykonywano w trzech powtórzeniach.

W pracy **P3** określono długość peletu (mm) za pomocą suwmiarki na 50 losowo wybranych peletach z każdego powtórzenia, a następnie wyciągnięto średnią arytmetyczną dla danego rodzaju peletu. Gęstość nasypową peletu (kg m^{-3}) oznaczono według normy EN ISO 17828:2016. Wytrzymałość mechaniczną peletów (%) oznaczono na podstawie normy PN-EN ISO 17831-1. Natomiast frakcję drobną (%) obliczono jako różnicę pomiędzy masą całkowitą analizowanej próby (100%), a masą uzyskanej frakcji drobnej.

3.5. Porównanie właściwości peletu do wybranych norm jakościowych

W celu porównania uzyskanych właściwości peletu oraz ich potencjalnej klasyfikacji wykorzystano trzy normy pochodzące z trzech różnych kontynentów: (i) Europa − ISO 17225-2:2021-10 (ISO) – Specification of graded wood pellets for commercial, residential applications and for industrial use (sześć klas peletu: A1, A2, B, I1, I2, I3); (ii) Ameryka Północna − Pellet Fuels Institute (PFI) − Standard Specifications for Residen-tial/Commercial Densified Fuel (trzy klasy peletu: Premium, Standard, Utility); (iii) Azja − Korea Forest Research Institute (KFRI) − Specifications and Quality Standards for Wood Pellets (cztery klasy peletu: Grade 1, Grade 2, Grade 3, Grade 4).

Trzeba dodać, że nie wszystkie normy wskazywały na wszystkie analizowane parametry, czyli nie limitowały danego parametru np. w zakresie wartości maksymalnej lub/oraz minimalnej, w takim przypadku uznawano, że dany pelet spełniał w zakresie tego parametru daną normę. Uzyskane średnie wartości parametrów dla każdego rodzaju peletu z biomasy leśnej, biomasy rolniczej oraz ich mieszanin odniesione zostały do najbardziej restrykcyjnego w każdej z trzech norm. Spełnienie przez dany pelet najbardziej restrykcyjnego wzorca oznaczało, że posiadał on najwyższą klasę jakości w danej normie. I tak w przypadku normy ISO był to wzorzec dla klasy A1, w przypadku normy PFI był to wzorzec dla klasy Premium, a w przypadku normy KFRI był to wzorzec dla klasy Grade 1. Ze względu na bardzo obszerny zakres i charakter badań oraz ilość analizowanych norm i klas jakości (łącznie 13 klas), odniesienie parametrów badanych peletów do trzech najbardziej restrykcyjnych klas (A1, Premium i Grade 1) zinterpretowano i zobrazowano w rozprawie doktorskiej oraz w głównej części publikacji **P3**. Natomiast parametry badanych peletów w odniesieniu do pozostałych dziesięciu klas z trzech norm: ISO, PFI i KFRI opisano syntetycznie w głównej części publikacji **P3** i dodatkowo przedstawiono w supplementary data **P3**.

3.6. Analiza kosztów i energochłonności produkcji peletu

Analizy kosztów i energochłonności produkcji peletu przeprowadzono na podstawie wyników uzyskanych w trakcie prowadzenia badań oraz danych uzyskanych z firmy, w której realizowano testy, jak również danych rynkowych związanych z produkcją peletu (**P4**). Trzeba dodać, że wszystkie wyniki zostały odniesione do linii peletyzacji o łącznej wydajności 1 Mg peletu w ciągu jednej godziny pracy. Założono, że produkcja peletu będzie prowadzona na dwóch zmianach przez 300 dni w roku. W związku z tym roczna wydajność linii została określona na 4800 ton peletu.

Punktem odniesienia w analizach kosztów produkcji peletu był poziom cen i kosztów w Polsce w 2022 r. Przeliczenia na Euro (€) z polskich złotych (PLN) dokonano według średnioważonego kursu Narodowego Banku Polski za 2022 r. (1,00 € = 4,6869 PLN). Stopa inflacji w 2022 roku w Polsce wynosiła średnio 14,4%. Koszt zakupu kompletnej linii do peletyzacji (łącznie z suszarnią) o wydajności 1 Mg w ciągu godziny pracy określono na 394717 €. Koszty amortyzacji przyjęto na poziomie 10%, natomiast koszty napraw, konserwacji oraz utrzymania ciągłości pracy na poziomie 5% całkowitych kosztów zakupu linii. Koszty pracy ludzkiej wynosiły 6,40 € h^{-1}, a koszty energii elektrycznej 0,132 € kWh^{-1}. Przyjęto, że surowce do peletyzacji będą kupowane przez zakład produkcji w cenie 10,67 € GJ^{-1} energii w nich zawartej. Transport surowców przyjęto z odległości 50 km w jedną stronę z wykorzystaniem zestawów samochodowych o całkowitej ładowności 80 metrów przestrzennych. Koszt transportu biomasy do zakładu wynosił 0,98 € km^{-1}. Założono, że suszenie biomasy realizowano w suszarni bębnowej, ogrzewanej kotłem na biomasę o mocy maksymalnej 1,5 MW. Zużycie biomasy o wartości opałowej 4,44 kWh Mg^{-1} w tym w kotle wynosiło 250 kWh h^{-1}. Natomiast łączna moc zainstalowanych urządzeń elektrycznych w suszarni wynosiła 122 kW, a w analizach założono, że ich obciążenie będzie wynosiło 70%, tj. 85,4 kWh. Mielenie surowców realizowano na młynkach bijakowych wyposażonych w silniki o łącznej mocy 37 kW. Z kolei łączna moc wszystkich urządzeń elektrycznych wykorzystanych na etapie przygotowana surowców (młyny, podajniki, wentylator, kondycjoner) wynosiła 67 kW, a ich obciążenie wynosiło 70%. Natomiast łączna moc urządzeń elektrycznych wykorzystanych na etapie peletowania surowców (peletyzator, podajniki, odsiewacz, wentylator, chłodnica) wynosiła 117,5 kW, a ich obciążenie wynosiło 70%.

Na całkowite nakłady energetyczne produkcji peletu (kWh Mg^{-1}) składały się nastepujące nakłady jednostkowe: produkcja zrębków SRWC, transport biomasy, suszenie, mielenie łącznie z przygotowaniem surowców, peletyzacja łącznie z przesiewaniem i chłodzeniem peletu, zużycie linii do peletyzacji, folia do pakowania peletu, praca ludzi. Nakłady energetyczne na produkcję zrębków SRWC robinii akacjowej, wierzby i topoli wynosiły odpowiedno 177,43; 95,83 i 93,06 kWh Mg^{-1} świeżej masy (Stolarski i in. 2016). Współczynnik konwersji energii dla oleju napędowego wynosił 11,97 kWh kg^{-1} (Neeft i in. 2011). Ilość energii zużytej do suszenia trocin sosny i brzozy wynosiła 1196,51 kWh Mg^{-1} gotowego surowca do produkcji peletu, a w dla zrębków SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) wartość ta była o 40% wyższa. Mielenie łącznie z przygotowaniem trocin sosny pochłaniało 46,9 kWh Mg^{-1} gotowego surowca do produkcji peletu, a dla brzozy wartość ta była o 25% wyższa. Z kolei dla zrębków SRWC topoli i wierzby wartość ta była o 100%

wyższa, a dla robinii akacjowej o 125% wyższa, w porównaniu do trocin sosny. Peletyzacja sosny, topoli i wierzby łącznie z przesiewaniem i chłodzeniem peletu pochłaniała 82,3 kWh Mg^{-1} peletu. Natomiast dla brzozy i robinii akacjowej wartość ta była o 25% wyższa. Nakłady energetyczne związane z wykorzystaniem linii do peletyzacji (30,56 kWh kg^{-1} masy linii), foli (0,87 kWh kg^{-1}) i pracy ludzkiej (16,67 kWh h^{-1}) w procesie produkcji peletu obliczono współczynnikami podanymi w literaturze (Szeptycki i Wójcicki 2003; Neeft i in. 2011).

Wartość energetyczną poszczególnych rodajów peletów (energy output) stanowiła ich wartość opałowa. Zysk energii był różnicą między wartością opałową peletu a całkowitym nakładem energii (energy input) poniesionym na jego produkcję. Określono również wskaźnik efektywnośći energetycznej (energy ratio) produkcji peletów na podstawie ilorazu ich wartości energetycznej (energy output) do całkowitych nakładów poniesionych na ich produkcję (energy input).

3.7. Analiza statystyczna

Przed wykonaniem analiz statystycznych, testem Shapiro-Wilk sprawdzono normalność badanych cech. W przypadku wyników uzyskanych z doświadczenia polowego (**P1**) oraz dla wszystkich cech jakości biomasy SRWC (**P2**) analizy statystyczne wykonano na podstawie analizy wariancji z powtarzanymi pomiarami (ang. Repeated Measures ANOVA). W analizie tej gatunek SRWC i sposób wzbogacenia gleby były czynnikami stałymi i grupującymi, natomiast kolejne trzy rotacje zbioru (2013, 2017, 2021) były czynnikiem powtarzanych pomiarów. Wyliczono też procentowy udział wszystkich badanych efektów w ogólnej sumie kwadratów danej analizy wariancji. W ten sposób otrzymano miarę udziału w badanej zmienności rozumianej jako procent wyjaśnienia wariancji przez każdy pojedynczy efekt modelu analizy. Dodatkowo wykonano analizę wariancji dla całkowitego plonu suchej masy i całkowitej wartości energetycznej plonu biomasy z 12 lat uprawy. Analizy statystyczne wyników uzyskanych w pracy **P3** oparto na jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA). W analizie tej czynnikiem był rodzaj peletu.

Dla wszystkich badanych cech (**P1, P2, P3**) obliczono średnie arytmetyczne oraz współczynnik zmienności lub błąd standardowy średniej lub odchylenie standardowe. Za pomocą testu istotności Tukey'a (HSD) wyznaczono grupy jednorodne przy poziomie istotności $P<0,05$. Określono również współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy analizowanymi cechami. Dodatkowo wyznaczono również statystyki opisowe (**P1, P2, P4**) dla całego zbioru danych jak: średnia, mediana, wartość minimalna, wartość maksymalna, dolny kwartyl, górny kwartyl, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Ponadto dla

badanych cech SRWC wykonano aglomeracyjną hierarchiczną analizę skupień (**P1, P2, P3, P4**). Przed wykonaniem analiz dane wejściowe standaryzowano w kolumnach. Jako metodę aglomeracji wybrano metodę Ward'a, a miarą odległości była odległość euklidesowa. Klastry wyodrębniono za pomocą kryterium Sneath'a. Zastosowano dwie linie odcięcia na dendrogramie, pierwsza umieszczona została na 2/3 D_{max}, a druga na 1/3 D_{max}, gdzie D_{max} oznaczało maksymalną miarę odległości D. Wszystkie analizy statystyczne wykonano za pomocą oprogramowania STATISTICA 13 (TIBCO Software Inc.).

4. Wyniki badań i dyskusja

4.1. Warunki klimatyczne (P1)

W związku z tym, że SRWC były uprawiane przez 12 lat w kolejnych rotacjach to w tabeli 3 przedstawiono średnie sumy opadów (mm) i średnie temperatury powietrza (°C) w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru i w okresie wielolecia. Średnia roczna (styczeń–grudzień) temperatura powietrza w pierwszej rotacji zbioru (2010–2013) była niższa o 0,7 ^{o}C od średniej rocznej z okresu wielolecia (1998–2021). Natomiast w drugiej (2014–2017) i trzeciej (2018–2021) rotacji zbioru sytuacja była odwrotna, ponieważ średnia roczna temperatura powietrza była wyższa o odpowiednio 0,3 i 0,6 ^{o}C od średniej rocznej z okresu wielolecia. W przypadku trzeciej rotacji zbioru również średnia temperatura powietrza za okres wegetacji roślin (kwiecień–październik) była wyższa o taką samą wartość jak średnia wieloletnia dla całego roku. Natomiast w pierwszej i drugiej rotacji zbioru średnie temperatury powietrza za okres wegetacji roślin były tylko nieznacznie niższe od analogicznej średniej z okresu wielolecia.

Inna sytuacja wystąpiła w przypadku opadów atmosferycznych, ponieważ tylko podczas pierwszej rotacji zbioru zarówno roczna suma opadów (707 mm) jak i suma za okres wegetacji (521 mm) były wyższe od wartości z wielolecia, o odpowiednio 3,7% i 10,5% (tab. 3). Natomiast podczas drugiej rotacji zbioru zarówno roczna suma opadów jak i za okres wegetacji były niższe i stanowiły odpowiednio 95.6% i 91.1% wartości z wielolecia. Jeszcze niższe opady wystąpiły podczas trzeciej rotacji zbioru, gdzie wartości te stanowiły odpowiednio 68,2% i 78,1% wartości z wielolecia. W związku z powyższym należy stwierdzić, że w kolejnych rotacjach zbioru średnie temperatury powietrza wzrastały, a opady malały w porównaniu do wartości z wielolecia.

Tabela 3. Średnie sumy opadów (mm) i średnie temperatury powietrza (°C) w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru i w okresie wielolecia (źródło: opracowanie własne)

Miesiąc	Pierwsza rotacja (2010-2013)		Druga rotacja (2014-2017)		Trzecia rotacja (2018-2021)		Wielolecie (1998-2021)	
	mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C
Styczeń	38,8	-4,5	37,1	-2,9	27,5	-1,0	35,9	-2,5
Luty	36,2	-4,4	23,5	0,6	8,3	-1,1	31,5	-1,3
Marzec	25,0	1,0	51,4	4,5	14,6	2,3	43,0	2,5
Kwiecień	47,6	8,1	44,4	8,0	9,8	8,5	38,7	8,4
Maj	63,4	13,7	57,9	13,5	55,8	13,0	61,4	13,3
Czerwiec	97,1	16,6	64,4	16,1	67,3	18,9	85,0	16,9
Lipiec	110,2	19,3	88,1	18,6	80,3	19,1	100,4	18,9
Sierpień	111,7	18,3	53,6	18,5	77,5	18,6	88,3	18,3
Wrzesień	50,0	13,2	50,8	14,3	32,7	14,7	41,4	13,9
Październik	41,5	7,9	70,7	7,8	45,3	9,6	56,9	8,3
Listopad	45,2	4,6	61,4	3,9	21,8	4,7	54,6	4,3
Grudzień	40,4	-1,6	48,7	1,7	24,2	0,3	44,7	0,0
Kwiecień-Październik	521,4	13,9	429,8	13,8	368,5	14,6	472,0	14,0
Styczeń-Grudzień	707,0	7,7	651,9	8,7	464,7	9,0	681,6	8,4

4.2. Liczba roślin, przeżywalność i cechy biometryczne (P1)

Liczba roślin i ich przeżywalność były istotnie różnicowane przez gatunek SRWC i rotację zbioru oraz interakcję pomiędzy tymi czynnikami (P<0,001). Natomiast sposób wzbogacenia gleby nie miał istotnego wpływu na te cechy (tab. 4). Spośród badanych gatunków SRWC istotnie najwyższą liczbą roślin charakteryzowała się topola (10038 sztuk ha^{-1}), co oznaczało, że po trzech czteroletnich rotacjach zbioru przeżywalność tego gatunku wynosiła średnio 90,3% (tab. 5). W tej samej grupie jednorodnej znalazła się wierzba, chociaż przeżywalność roślin tego gatunku po 12 latach uprawy była niższa i wynosiła średnio niespełna 85%. Natomiast zdecydowanie najniższą przeżywalnością charakteryzowała się robinia akacjowa, średnio 60,8%. Niższa przeżywalność roślin robinii akacjowej wynikała z niskich opadów atmosferycznych w roku założenia doświadczenia w kwietniu 2010 roku, co spowodowało, że niektóre zielne sadzonki robinii zaschły po ich wysadzeniu i nie wznowiły już wegetacji mimo wysokich opadów w maju 2010. Natomiast zdrewniałe zrzezy wierzby i topoli znosiły te warunki zdecydowanie korzystniej, ponieważ były one całe umieszczone w

glebie i zachowały wilgotność wewnętrzną, a w wyniku wysokich opadów w maju kontynuowały wegetację (Stolarski i in. 2015). Potwierdzeniem tego jest fakt, że przeżywalność robinii akacjowej była najniższa w pierwszej czteroletniej rotacji zbioru (57,1%) i wzrastała w drugiej i trzeciej rotacji zbioru do odpowiednio 59,6% i 65,6% (tab. 5). Wzrost ten wynikał z tego, że robinia akacjowa ma możliwość tworzenia nowych roślin z systemu korzeniowego, co też obserwowano w badaniach własnych. Natomiast w przypadku topoli i wierzby przeżywalność roślin w kolejnych rotacjach zbioru zmniejszała się. Chociaż większą stabilnością w tym zakresie charakteryzowała się topola, ponieważ przeżywalność tego gatunku w pierwszej rotacji zbioru wynosiła 92,3%, a w trzeciej rotacji była o 5,4 punktu procentowego (pp.) niższa. Natomiast wierzba w pierwszej rotacji zbioru charakteryzowała się najwyższą przeżywalnością (94,8%) spośród badanych gatunków SRWC, ale a w trzeciej rotacji była ona niższa aż o 20,6 pp. Analiza statystyczna potwierdziła, że największy udział w zmienności liczby roślin i ich przeżywalności miał gatunek SRWC, który wynosił 56% ogólnej wariancji (tab. 4). Natomiast sposób wzbogacenia gleby i rotacja zbioru oraz interakcje tych czynników wywierały znikomy wpływ na te cechy.

Tabela 4. Analiza wariancji powtarzanych pomiarów (*P*) oraz procentowy udział efektów w łącznej sumie kwadratów dla badanych cech (źródło: opracowanie własne)

Źródło zmienności	df	Liczba roślin i przeżywalność		Liczba pędów na karpie		Wysokość rośliny		Średnica pędu		Plon suchej masy		Wartość energetyczna plonu	
		P	Udział (%)	*P*	Udział (%)	*P*	Udział (%)	*P*	Udział (%)	*P*	Udział (%)	*P*	Udział (%)
Gatunek (A)	2	<0,001*	56,1	<0,001*	22,2	<0,001*	56,0	<0,001*	47,6	<0,001*	32,4	<0,001*	27,5
Sposób wzbogacenia gleby (B)	7	0,763	1,4	0,053	2,9	<0,001*	8,1	<0,001*	8,8	<0,001*	24,4	<0,001*	25,7
A × B	14	0,256	6,2	0,927	1,3	0,622	3,3	0,344	5,7	0,229	6,0	0,241	6,2
Błąd 1	48		16,7		9,0		13,5		16,9		15,6		16,4
Rotacja zbioru (R)	2	<0,001*	2,0	<0,001*	37,8	<0,001*	2,4	<0,001*	1,5	<0,001*	4,6	<0,001*	5,3
R × A	4	<0,001*	8,3	<0,001*	7,7	<0,001*	6,4	<0,001*	7,0	<0,001*	4,1	<0,001*	4,8
R × B	14	0,737	0,8	0,417	2,0	0,962	0,5	0,480	1,2	0,071	2,1	0,061	2,4
R × A × B	28	0,966	1,2	0,479	3,9	0,586	2,1	0,208	3,0	0,730	2,1	0,671	2,3
Błąd 2	96		7,4		13,2		7,7		8,3		8,7		9,3
Razem			100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0

* wartości istotne (*P*<0,05); udział (%) procentowy udział w łącznej sumie kwadratów

Tabela 5. Przeżywalność roślin oraz cechy biometryczne SRWC w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru (źródło: opracowanie własne)

Źródło zmienności	Wyszczególnienie	Przeżywalność (%)	Liczba pędów (sztuk)	Wysokość rośliny (m)	Średnica pędu (mm)
Gatunek (A)	Robinia akacjowa	60,8 b (19,9)	2,2 b (33,2)	4,34 b (31,2)	35,1 b (24,9)
	Topola	90,3 a (7,7)	1,8 c (40,6)	7,09 a (13,0)	51,7 a (13,3)
	Wierzba	84,9 a (16,6)	3,1 a (49,0)	6,60 a (13,0)	35,6 b (24,2)
Sposób wzbogacenia gleby (B)	C	76,5 (27,6)	2,4 (55,7)	5,44 b (28,6)	36,3 b (26,4)
	L	80,0 (22,3)	2,5 (48,1)	6,30 ab (26,5)	42,3 ab (27,5)
	F	76,1 (21,1)	2,7 (56,6)	5,54 ab (28,7)	38,1 ab (31,5)
	LF	82,0 (14,3)	2,0 (44,4)	6,58 a (21,0)	46,0 a (20,1)
	M	80,0 (22,2)	2,3 (50,0)	5,64 ab (27,3)	37,1 b (31,3)
	MF	80,0 (23,0)	2,2 (46,3)	5,63 ab (28,5)	39,6 ab (32,1)
	LM	76,3 (24,0)	2,3 (49,9)	6,36 ab (24,5)	43,0 ab (22,9)
	LMF	78,3 (20,6)	2,5 (48,9)	6,56 a (23,9)	44,2 ab (21,7)
Rotacja zbioru (R)	Pierwsza (R1)	81,4 a (23,7)	1,3 b (16,7)	5,69 b (31,8)	42,3 a (25,2)
	Druga (R2)	79,0 a (21,3)	2,9 a (39,1)	6,04 a (23,8)	39,0 b (27,5)
	Trzecia (R3)	75,6 b (19,7)	2,9 a (40,8)	6,30 a (23,8)	41,1 a (29,2)
A × B	Robinia akacjowa C	51,1 (18,2)	2,0 (22,2)	3,68 (22,0)	32,9 (26,7)
	Robinia akacjowa L	63,9 (28,2)	2,4 (35,8)	4,73 (31,6)	36,2 (33,2)
	Robinia akacjowa F	60,6 (18,7)	2,6 (43,5)	3,63 (24,8)	30,0 (27,7)
	Robinia akacjowa LF	74,4 (7,8)	2,0 (21,7)	5,52 (30,9)	42,8 (13,3)
	Robinia akacjowa M	61,1 (15,2)	2,1 (26,4)	3,73 (13,4)	31,2 (14,6)
	Robinia akacjowa MF	60,6 (16,2)	2,1 (42,6)	3,64 (24,1)	31,9 (19,3)
	Robinia akacjowa LM	54,4 (13,3)	2,2 (27,1)	4,60 (28,7)	36,6 (28,2)
	Robinia akacjowa LMF	60,0 (18,2)	2,2 (32,3)	5,21 (28,9)	39,5 (15,2)
	Topola C	95,0 (0,0)	1,8 (62,1)	6,81 (17,1)	45,6 (13,5)
	Topola L	90,6 (8,9)	1,7 (33,5)	7,06 (20,1)	48,9 (22,3)
	Topola F	88,9 (5,5)	2,1 (38,1)	6,92 (12,4)	52,1 (10,6)
	Topola LF	91,7 (7,2)	1,5 (24,3)	7,34 (13,4)	56,8 (6,4)
	Topola M	95,0 (4,6)	1,6 (30,3)	7,13 (9,0)	51,6 (9,7)
	Topola MF	90,6 (9,3)	1,7 (29,5)	7,06 (6,9)	55,1 (7,6)
	Topola LM	85,0 (7,2)	1,7 (30,4)	7,12 (7,8)	50,6 (10,1)
	Topola LMF	86,1 (9,1)	2,0 (53,0)	7,25 (15,3)	52,7 (13,9)
	Wierzba C	83,3 (17,0)	3,4 (47,9)	5,84 (3,8)	30,6 (19,8)
	Wierzba L	85,6 (16,4)	3,3 (44,6)	7,11 (11,4)	41,8 (22,2)
	Wierzba F	78,9 (19,0)	3,4 (64,2)	6,07 (5,5)	32,1 (17,2)
	Wierzba LF	80,0 (17,4)	2,5 (53,8)	6,89 (8,2)	38,3 (12,3)
	Wierzba M	83,9 (18,8)	3,1 (47,4)	6,07 (7,6)	28,5 (20,7)
	Wierzba MF	88,9 (19,2)	2,8 (46,3)	6,2 (8,0)	31,8 (25,2)
	Wierzba LM	89,4 (15,2)	3,0 (53,2)	7,37 (9,9)	41,7 (19,8)
	Wierzba LMF	88,9 (10,8)	3,5 (41,0)	7,23 (16,3)	40,3 (22,7)
A × R	Robinia akacjowa R1	57,1 e (19,8)	1,5 c (12,9)	3,30 d (15,4)	32,2 c (18,8)
	Robinia akacjowa R2	59,6 de (18,8)	2,6 b (22,2)	4,66 c (21,8)	34,3 c (21,3)
	Robinia akacjowa R3	65,6 cd (19,1)	2,6 b (24,5)	5,06 c (31,8)	38,8 bc (28,4)
	Topola R1	92,3 ab (6,8)	1,1 c (7,9)	6,84 ab (5,6)	52,6 a (11,0)
	Topola R2	91,9 ab (6,8)	2,1 b (40,9)	7,12 ab (16,5)	49,8 a (16,2)
	Topola R3	86,9 ab (8,3)	2,1 b (17,1)	7,30 a (13,4)	52,7 a (12,3)
	Wierzba R1	94,8 a (7,9)	1,4 c (11,6)	6,94 ab (12,2)	42,3 b (18,8)
	Wierzba R2	85,6 b (11,7)	3,9 a (25,9)	6,33 b (13,0)	33,0 c (22,4)
	Wierzba R3	74,2 c (20,6)	4,0 a (31,8)	6,52 ab (12,5)	31,7 c (20,4)

Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności i ich interakcji oddzielnie dla każdej cechy, brak liter oznacza braku istotności; (współczynniki zmienności – %)

Liczba pędów była istotnie różnicowana tylko przez gatunek SRWC i rotację zbioru oraz interakcję pomiędzy tymi czynnikami. Natomiast średnica pędu i wysokość rośliny były istotnie różnicowane (P<0,001) przez te same czynniki oraz dodatkowo przez sposób wzbogacenia gleby (tab. 4). Przy czym największy udział w zmienności liczby pędów miała rotacja zbioru (37,8%), a w przypadku średnicy pędu i wysokości roślin gatunek SRWC, odpowiednio 47,6 i 56,0% ogólnej wariancji. Spośród badanych gatunków SRWC istotnie najwyższą liczbą pędów na karpie (średnio 3,1 sztuk) charakteryzowała się wierzba (tab. 5). W kolejnych grupach jednorodnych znalazły się robinia akacjowa, a następnie topola, dla której wartość tej cechy była najniższa (średnio 1,8 sztuk). W pierwszej rotacji zbioru liczba pędów na karpie była najniższa i na tym samym poziomie u wszystkich badanych gatunków SRWC. Istotnie wzrosła ona w drugiej i trzeciej rotacji zbioru, przy czym najwyższa była u wierzby (około 4 pędy na karpie), następnie u robinii akacjowej (2,6), a najniższa była u topoli (2,1).

Trzeba podkreślić, że topola wykształcała istotnie wyższe rośliny (średnio 7,09 m) o grubszych pędach (średnio 51,7 mm) w porównaniu do dwóch pozostałych gatunków SRWC (tab. 5). Pomimo, że wysokość roślin wierzby była statystycznie na tym samym poziomie, co topoli, to w istocie były one średnio o 0,5 m niższe. Z kolei średnica pędu wierzby była istotnie niższa (średnio 35,6 mm) niż u topoli. Natomiast średnica pędu u robinii akacjowej była na tym samym poziomie co u wierzby, ale rośliny robinii były istotnie najniższe (średnio 4,34 m). Należy również podkreślić, że średnica pędu i wysokość roślin topoli była bardziej wyrównana niż pozostałych gatunków, o czym świadczą również niższe wartości współczynnika zmienności. Z analizy różnych sposobów wzbogacenia gleby wynika, że rośliny uprawiane w wariancie z ligniną i nawożeniem mineralnym (LF) były średnio istotnie wyższe (6,58 m) i wytwarzały grubsze pędy (46,0 mm) w porównaniu do obiektów kontrolnych (C). W przypadku wysokości roślin wysokie były również rośliny z obiektów LMF (grupa jednorodna „a”), a z pozostałych sposobów wzbogacenia gleby znalazły się w pośredniej grupie jednorodnej „ab”. Natomiast w przypadku średnicy pędów prawie wszystkie sposoby wzbogacenia gleby znalazły się w pośredniej grupie jednorodnej „ab”, oprócz obiektu M (grupa jednorodna „b”). Z kolei w analizując rotacje zbioru stwierdzono, że najwyższe rośliny (7,30 m) o najgrubszych pędach (52,7 mm) dała topola w trzeciej rotacji zbioru. Również analiza korelacji wykazała, że wysokość roślin była istotnie dodatnio skorelowana (0,67) ze średnicą pędu. Z kolei średnica była ujemnie skorelowana z liczbą pędów (-0,41).

4.3. Plon biomasy SRWC i jego wartość energetyczna (P1)

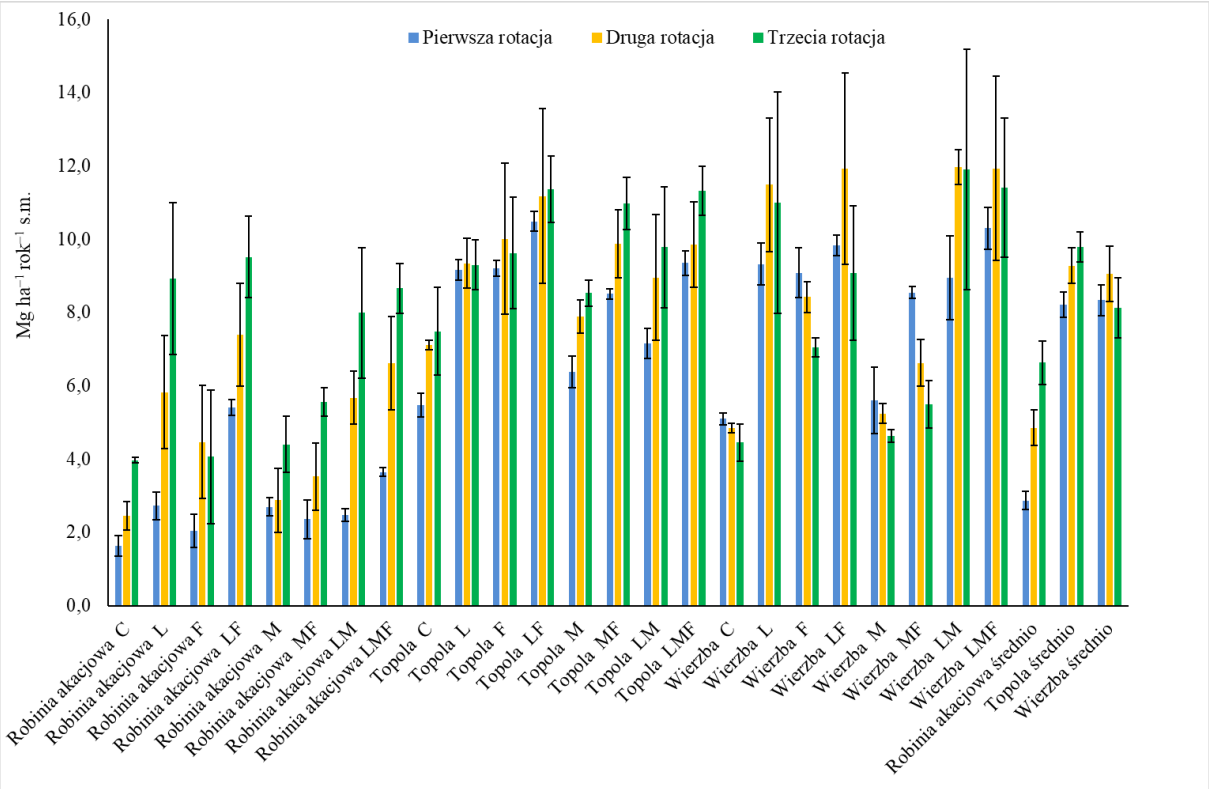
Plon suchej masy był istotnie różnicowany (P<0,001) przez wszystkie trzy czynniki gatunek SRWC, sposób wzbogacenia gleby i rotację zbioru oraz interakcję pomiędzy gatunkiem a rotacją zbioru (tab. 4). Jednakże największy udział w zmienności plonu suchej masy miały gatunek SRWC 32,4% i sposób wzbogacenia gleby 24,4%, a rotacja zbioru tylko 4,6% ogólnej wariancji. Spośród badanych gatunków SRWC najwyższym plonem suchej masy (średnio 9,1 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) charakteryzowała się topola, a współczynnik zmienności tego parametru był najniższy (tab. 6). Plon biomasy wierzby był statystycznie na tym samym poziomie co topoli, ale był on średnio o 6,5% niższy. Natomiast robinia akacjowa plonowała istotnie najniżej, średnio 4,78 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m. (grupa jednorodna „b"). Analiza sposobów wzbogacenia gleby wykazała, że najwyższy plon biomasy (średnio 9,57 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) uzyskano w wariancie, w którym zastosowano ligninę i nawożenie mineralne (LF). Na kolejnych miejscach uplasowały się obiekty, w których również stosowano ligninę, były to: LMF, L i LM (grupa jednorodna „ab"), a plony suchej masy były średnio niższe odpowiednio o 3,5%, 10,5% i 13,1% w porównaniu do obiektu LF. Natomiast najniższe plony biomasy uzyskano z obiektów M i C (grupa jednorodna „c") i były one niższe aż o odpowiednio 44,0% i 50,6% w porównaniu do wartości dla obiektu LF. W ocenie plonowania SRWC w zależności od rotacji zbioru stwierdzono, że średni plon biomasy wzrastał w kolejnych czteroletnich rotacjach. Najniższy był on w pierwszej rotacji zbioru, średnio 6,48 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m., a w drugiej i trzeciej rotacji był on istotnie wyższy o odpowiednio 19,3% i 26,4%. Przy czym należy podkreślić, że wśród badanych gatunków SRWC występowały różnice, to znaczy najwyżej plonowała topola w trzeciej rotacji zbioru, średnio 9,80 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m. (grupa jednorodna „a"). W pośredniej grupie jednorodnej „abc" znalazły się plony tego gatunku z drugiej i pierwszej rotacji zbioru i były one niższe o odpowiednio 5,3% i 16,2%. Również plony wierzby znalazły się tej pośredniej grupie jednorodnej, przy czym wierzba najwyższy plon dała w drugiej rotacji zbioru (średnio 9,05 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) i był on o 7,6% niższy od najwyższego plonu dla topoli. Z kolei plony biomasy robinii akacjowej były istotnie niższe w porównaniu do topoli i wierzby, ale z drugiej strony istotnie wzrastały od pierwszej, przez drugą do trzeciej rotacji zbioru z poziomu odpowiednio 2,87; 4,85 i 6,63 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.

Tabela 6. Plon suchej masy i wartość energetyczna plonu SRWC w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru (źródło: opracowanie własne)

Źródło zmienności	Wyszczególnienie	Plon suchej masy (Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.)	Wartość energetyczna plonu (GJ ha^{-1} rok^{-1})
Gatunek (A)	Robinia akacjowa	4,78 b (57,3)	80,59 b (58,1)
	Topola	9,10 a (23,3)	142,00 a (23,1)
	Wierzba	8,51 a (39,3)	137,23 a (39,6)
Sposób wzbogacenia gleby (B)	C	4,72 c (41,7)	75,84 c (39,8)
	L	8,56 ab (39,5)	137,84 ab (39,6)
	F	7,11 bc (46,1)	114,05 bc (44,7)
	LF	9,57 a (30,7)	154,30 a (29,9)
	M	5,36 c (39,1)	85,56 c (36,7)
	MF	6,83 bc (42,7)	109,15 bc (40,6)
	LM	8,31 ab (43,9)	134,24 ab (43,7)
	LMF	9,23 ab (33,9)	148,55 ab (33,3)
Rotacja zbioru (R)	Pierwsza (R1)	6,48 b (47,3)	103,44 b (46,5)
	Druga (R2)	7,73 a (45,4)	123,65 a (44,3)
	Trzecia (R3)	8,19 a (40,5)	132,73 a (40,0)
A × B	Robinia akacjowa C	2,68 (41,2)	45,24 (42,5)
	Robinia akacjowa L	5,82 (60,3)	97,77 (61,2)
	Robinia akacjowa F	3,52 (67,6)	59,60 (68,6)
	Robinia akacjowa LF	7,43 (31,8)	125,01 (32,9)
	Robinia akacjowa M	3,32 (39,4)	55,73 (40,1)
	Robinia akacjowa MF	3,81 (44,9)	64,08 (45,6)
	Robinia akacjowa LM	5,38 (54,5)	91,02 (55,8)
	Robinia akacjowa LMF	6,31 (39,9)	106,25 (40,9)
	Topola C	6,69 (21,3)	105,00 (21,1)
	Topola L	9,27 (9,3)	145,15 (9,6)
	Topola F	9,61 (23,4)	150,44 (23,6)
	Topola LF	11,01 (20,5)	171,61 (20,3)
	Topola M	7,60 (15)	118,01 (14,4)
	Topola MF	9,78 (15,2)	152,54 (15,0)
	Topola LM	8,63 (27,7)	135,26 (27,0)
	Topola LMF	10,18 (14,6)	157,97 (14,5)
	Wierzba C	4,80 (11,6)	77,28 (11,6)
	Wierzba L	10,6 (30,6)	170,60 (31,2)
	Wierzba F	8,18 (14,1)	132,11 (13,7)
	Wierzba LF	10,27 (29,7)	166,27 (30,3)
	Wierzba M	5,16 (18,2)	82,93 (17,8)
	Wierzba MF	6,89 (22,7)	110,84 (22,2)
	Wierzba LM	10,94 (30,9)	176,44 (31,8)
	Wierzba LMF	11,22 (25,5)	181,41 (26,1)
A × R	Robinia akacjowa R1	2,87 e (42,5)	47,20 e (42,5)
	Robinia akacjowa R2	4,85 d (49,4)	81,98 d (49,4)
	Robinia akacjowa R3	6,63 c (44,2)	112,59 c (44,3)
	Topola R1	8,21 abc (20,6)	129,96 bc (20,5)
	Topola R2	9,28 ab (25,6)	142,29 abc (25,5)
	Topola R3	9,80 a (20,5)	153,75 a (20,6)
	Wierzba R1	8,34 abc (24,8)	133,16 abc (24,7)
	Wierzba R2	9,05 ab (40,7)	146,68 ab (40,9)
	Wierzba R3	8,13 abc (49,4)	131,86 abc (49,9)

Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności i ich interakcji oddzielnie dla każdej cechy, brak liter oznacza braku istotności; (współczynniki zmienności – %)

Jeszcze bardziej wyraźne zróżnicowanie w plonach biomasy badanych gatunków SRWC w kolejnych rotacjach zbioru można zauważyć analizując wpływ zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby (rys. 2). W całym eksperymencie najwyższy plon biomasy (około 11,9 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) dała wierzba uprawiana w wariancie LM w drugiej i trzeciej rotacji zbioru i był to wzrost o około 33-34% w porównaniu do wartości uzyskanej w pierwszej rotacji zbioru (rys. 2, tab. 7). Na takim samym wysokim poziomie plonowała też wierzba uprawiana w wariancie LMF w drugiej rotacji zbioru, przy czym w porównaniu do pierwszej rotacji zbioru był to wzrost o około 16%. Ponadto trzeba podkreślić, że w przypadku wierzby stwierdzono wzrost plonu biomasy w drugiej rotacji zbioru w porównaniu do wartości uzyskanych w pierwszej rotacji tylko dla wariantów wzbogacenia gleby w których zastosowano ligninę tj: L, LF, LM i LMF. Natomiast w trzeciej rotacji zbioru wierzby plon biomasy był wyższy w porównaniu do pierwszej rotacji tylko w wariantach L, LM i LMF. Z kolei w porównaniu do drugiej rotacji zbioru plony biomasy wierzby w trzeciej rotacji zbioru były niższe we wszystkich wariantach wzbogacenia gleby, co mogło być wynikiem zmniejszenia się liczby roślin i niższych opadów w okresie trzeciej rotacji zbioru. W przypadku topoli we wszystkich wariantach wzbogacenia gleby plony biomasy uzyskane w drugiej i trzeciej rotacji zbioru były wyższe w porównaniu do pierwszej rotacji zbioru. Przy czym najwyższy plon topola dała w trzeciej rotacji zbioru w wariancie LF (11,4 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) i był to wzrost o 8,3% w porównaniu do pierwszej rotacji zbioru. Natomiast największy przyrost biomasy topoli pomiędzy pierwszą a trzecią rotacją zbioru (36,8%) stwierdzono w wariancie LM, ale plon ten był niższy od najwyższej wartości uzyskanej dla tego gatunku i wyniósł 9,8 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m. Z kolei w przypadku robinii akacjowej dynamika zmiany plonów pomiędzy pierwszą, a drugą i trzecią rotacją zbioru była największa, co wynikało z jej niskiego plonowania w pierwszej rotacji. Największy przyrost biomasy robinii akacjowej pomiędzy pierwszą, a trzecią rotacją zbioru (227,8%) stwierdzono dla obiektu, w którym zastosowano ligninę (L), a plon w tym wariancie wyniósł 8,9 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m. Z kolei najwyższy plon robinii akacjowej (9,5 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) stwierdzono również w trzeciej rotacji zbioru ale dla obiektu LF. Trzeba tu dodać, że była to wysoka wartość porównywalna do plonów uzyskanych z niektórych obiektów dla wierzby czy topoli, a czasami nawet wyższa, szczególnie w porównaniu do obiektów C i M. Plon suchej biomasy SRWC był istotnie dodatnio skorelowany z wysokością roślin (0,79), średnicą pędu (0,61) oraz przeżywalnością roślin.



Rysunek 2. Plony suchej masy (Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) SRWC w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru; słupki błędów – oznaczają błąd standardowy średniej (źródło: opracowanie własne)

W związku z powyższym należy stwierdzać, że przeprowadzone badania wykazały duże zróżnicowanie w wysokości plonowania pomiędzy gatunkami SRWC jak również sposobami wzbogacenia gleby i rotacjami zbioru. Również wyniki innych badań potwierdzają, że plony biomasy były istotnie różnicowane przez wskazane powyżej czynniki (tab. 8).

Tabela 7. Procentowe zmiany (%) plonu suchej masy i wartości energetycznej plonu SRWC w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru. Przyjęto, że wartości w pierwszej rotacji dla poszczególnych wariantów to 100% (źródło: opracowanie własne)

Gatunek	Sposób wzbogacenia gleby	Pierwsza rotacja	Plon suchej masy		Wartość energetyczna plonu	
			Druga rotacja	Trzecia rotacja	Druga rotacja	Trzecia rotacja
Robinia akacjowa	C	100,0	150,0	242,7	154,1	252,4
	L	100,0	213,9	327,8	220,1	338,9
	F	100,0	219,0	199,0	224,9	204,7
	LF	100,0	137,0	176,2	140,2	181,8
	M	100,0	106,5	163,1	110,1	167,1
	MF	100,0	149,4	235,9	153,1	242,0
	LM	100,0	229,7	323,5	236,4	336,6
	LMF	100,0	181,4	237,4	186,6	245,2
	Średnio	100,0	169,0	231,1	173,7	238,5
Topola	C	100,0	129,8	136,7	125,7	136,1
	L	100,0	102,0	101,6	100,3	100,1
	F	100,0	108,7	104,6	105,3	104,5
	LF	100,0	106,5	108,3	102,2	108,2
	M	100,0	123,6	133,7	118,3	132,1
	MF	100,0	116,1	129,0	112,4	128,4
	LM	100,0	125,2	136,8	123,8	135,3
	LMF	100,0	105,4	121,1	101,7	119,0
	Średnio	100,0	112,9	119,3	109,5	118,3
Wierzba	C	100,0	95,1	87,3	95,5	87,9
	L	100,0	123,2	118,0	124,0	119,7
	F	100,0	92,8	77,6	93,6	78,9
	LF	100,0	121,3	92,3	124,3	93,5
	M	100,0	93,6	82,6	94,8	83,4
	MF	100,0	77,5	64,3	78,8	65,2
	LM	100,0	133,7	133,0	135,5	136,3
	LMF	100,0	115,9	110,8	118,4	113,2
	Średnio	100,0	108,6	97,4	110,2	99,0

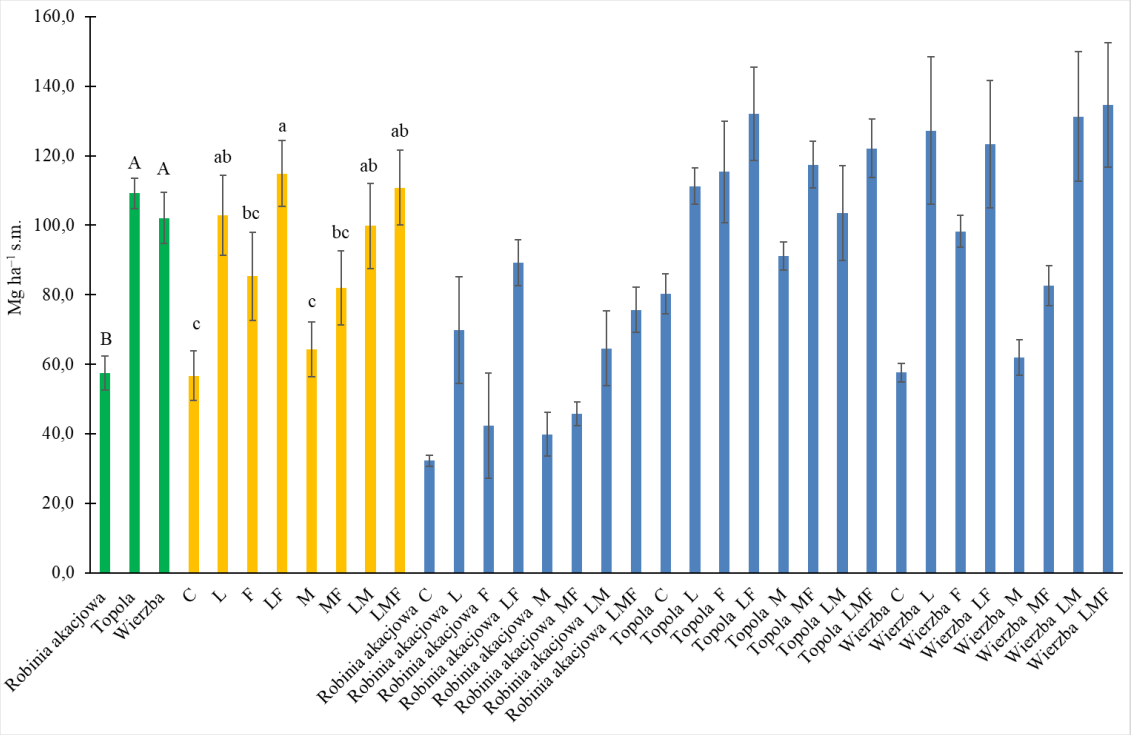
Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF)

Tabela 8. Plony SRWC w wybranych badaniach (źródło: opracowanie własne)

Kraj (autor)	Rotacja zbioru (lata)	Numer rotacji lub inny termin	Plon suchej masy (Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.)	Uwagi
Topola				
Belgia (Dillen i in. 2013)	4	średnio; max	4,3; 10,5	17 czystych gatunków i hybryd *Populus* spp. uprawianych na gruntach zdegradowanych
Kanada (Fortier i in. 2010)	6	zakres dla klonów i stanowisk	5,3–10,6; 2,0–16,9	Pięć genotypów, cztery stanowiska, gleby gliniaste i pylaste, zróżnicowane nawożenie
Czechy (Benetka i in. 2014)	3–4	zakres dla 1; 2; 3; 4	0,3–8,3; 1,9–15,4; 3,8–18,9; 2,5–15,9	Cztery genotypy, trzy stanowiska, cztery rotacje zbiorów
Włochy (Sabatti i in. 2014)	2	1; 2; 3	16,0; 20,0; 17,0	Sześć genotypów topoli uprawiano w trzech dwuletnich płodozmianach, na glebach bardzo żyznych, stosując nawożenie wysokoazotowe
Włochy (Guidi i in. 2009)	2; 3; 4	średnio	11,7; 15,0; 18,4	*P. deltoides* genotyp z nawożeniem mineralnym NPK
Włochy (Bergante i Facciotto, 2011)	2–3	1; 2; 3; 4; średnio	12,5; 7,5; 6,6; 7,6; 8,3	14 genotypów topoli, siedem *P. deltoides* i siedem *P.* × *canadensis*, cztery rotacje zbioru w ciągu dziewięciu lat uprawy
Polska (Stolarski i in. 2020a)	4	1; 2; średnio	3,6; 10,1; 6,9	Cztery genotypy topoli (*P. balsamifera*) uprawiane na glebie średniogliniastej z nawożeniem mineralnym NPK
USA (Pearson i in. 2010)	6	zakres; średnio	6,8–12,0; 9,7	Osiem genotypów *P. nig*ra × *P. maximowiczii*, *P. trichocarpa* × *P. deltoides*, *P. deltoides* × *P. nigra*, intensywna uprawa, nawadnianie
Wierzba				
Kanada (Labrecque i Teodorescu, 2005)	4	zakres; średnio	6,2–16,9; 11,7	Dziesięć genotypów wierzby, produkcja ekstensywna na stanowisku marginalnym
Dania (Nord-Larsen i in. 2015)	3	1; 2; max	6,5; 8,2; 15,1	25 stanowisk zarządzanych przez 14 różnych rolników, sześć różnych klonów
Polska (Stolarski i in. 2020b)	3	1; 2; max	11,3; 11,5; 20,0	15 genotypów wierzby na dwóch różnych, ale wysokiej jakości stanowiskach glebowych
Polska (Stolarski i in. 2019)	3	1; 2; 3; 4; średnio	17,2; 11,1; 14,0; 11,0; 13,3	Pięć genotypów wierzby uprawianej w czterech różnych gęstościach sadzenia
Szwecja (Aronsson i in. 2014)	3	zakres	5,9–13,2	Dwie odmiany, pięć różnych stanowisk, różne poziomy nawożenia
USA (Sleight i in. 2016)	3	1; 2; max	9,6; 10,5;14,4	25 genotypów, pięć różnych lokalizacji
USA (Serapiglia i in. 2013)	3	zakres	3,5–13,6	18 genotypów wierzby na dwóch różnych stanowiskach w trzyletnim cyklu, na różnych glebach
Robinia akacjowa				
Węgry (Rédei i Veperdi, 2009)	5–7	zakres	5,7–9,7	Trzy gęstość roślin 22; 13 i 6,6 tys. roślin na ha i pięć różnych klonów
Niemcy (Gruenewald i in. 2007)	3–6	zakres	4,0–6,0	Słabe stanowisko po dawnej kopalni odkrywkowej węgla brunatnego
Niemcy (Gruenewald i in. 2009)	3–6	zakres	3,0–10,0	Cztery lokalizacje ze słabymi stanowiskami
USA (Geyer 2006)	1	zakres	2,0–11,7	Gęstość sadzenia 111 tys. sadzonek na ha i sześć kolejnych zbiorów rocznych
USA (Geyer 2006)	5	zakres	8,6–11,1	Gęstość sadzenia trzy tysiące roślin na ha i cztery rotacje zbiorów
Polska (Stolarski i in. 2018)	1	średnio; max	2,7–4,4;3,3	Gęstość sadzenia 20 tys. sadzonek na ha i trzy rotacje zbioru

Z praktycznego punktu widzenia, obok średnich plonów suchej masy uzyskanych w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru SRWC, bardzo ważna jest całkowita suma plonu uzyskanego w czasie całego okresu użytkowania plantacji, czyli z okresu 12 lat. Z przeprowadzonych analiz wynika, że istotnie najwyższy całkowity plon suchej masy z trzech kolejnych czteroletnich rotacji zbioru dała topola, średnio 109,15 Mg ha^{-1} s.m. (rys. 3). Całkowity plon biomasy wierzby był statystycznie na tym samym poziomie co topoli, ale był on średnio o 7,06 Mg ha^{-1} s.m. niższy. Natomiast całkowity plon biomasy robinii akacjowej był istotnie najniższy, średnio 57,42 Mg ha^{-1} s.m., a więc była to wartość aż o 47,4% niższa w porównaniu do topoli. Analiza sposobów wzbogacenia gleby wykazała, że najwyższy całkowity plon biomasy (średnio 114,87 Mg ha^{-1} s.m.) uzyskano w wariancie, w którym zastosowano ligninę i nawożenie mineralne (LF). Na kolejnych miejscach uplasowały się obiekty, w których również stosowano ligninę, były to: LMF, L i LM (grupa jednorodna „ab"), a całkowite plony suchej masy były średnio niższe odpowiednio o 4,1; 12,1 i 15,1 Mg ha^{-1} s.m. w porównaniu do obiektu LF. Natomiast najniższe całkowite plony biomasy uzyskano z obiektów M i C (grupa jednorodna „c") i były one niższe aż o odpowiednio 50,6 i 58,2 Mg ha^{-1} s.m. w porównaniu do wartości dla obiektu LF. Z kolei analizując wpływ zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby na plonowanie badanych gatunków SRWC stwierdzono, że najwyższy całkowity plon w całym eksperymencie uzyskano dla wierzby w obiekcie wzbogacenia gleby LMF (134,59 Mg ha^{-1} s.m.). Z kolei najwyższe całkowite plony biomasy topoli i robinii akacjowej uzyskano w obiektach LF i były one o odpowiednio 1,9% i 33,7% niższe w porównaniu do najwyższej wartości uzyskanej dla wierzby. Trzeba również podkreślić, że badane gatunki SRWC, robinia akacjowa, topola i wierzba, dały najniższy całkowity plon biomasy z obiektów kontrolnych (C) czyli bez żadnego sposobu wzbogacenia gleby, odpowiednio 32,21; 80,30 i 57,58 Mg ha^{-1} s.m. Tak więc zastosowane sposoby wzbogacenia gleby L, F, LF, M, MF, LM, LMF spowodowały wzrost całkowitego plonu biomasy w przypadku robinii akacjowej odpowiednio o: 117, 31, 177, 24, 42, 100 i 135%; w przypadku topoli był to wzrost odpowiednio o: 39, 44, 65, 14, 46, 29 i 52%; a w przypadku wierzby był to wzrost odpowiednio o: 121, 71, 114, 7, 44, 128 i 134%. Na podstawie tych danych można wnioskować, że zastosowane sposoby wzbogacenia gleby bardziej wpływały na zwiększenie plonowania robinii akacjowej (średnio 78%) i wierzby (średnio 77%), niż w przypadku topoli (średnio 36%). Potencjalne wyjaśnienie tego wyniku może być takie, że topola potrafiła lepiej korzystać z mniej dostępnych form związków pokarmowych oraz wody niż wierzba i robinia akacjowa. Dlatego też nawet w obiekcie kontrolnym plony topoli były stosunkowo wysokie co spowodowało, że różnica pomiędzy kontrolą a obiektami wzbogacania

gleby były niższe niż u wierzby i robinii akacjowej. Ponadto również inne badania wykazały, że dostarczanie azotu w uprawie topoli determinowało słabą wydajność agronomiczną i tylko niewielka część zastosowanego N była odzyskiwana przez rośliny uprawne (Ceotto i in. 2016). Natomiast spośród zastosowanych sposobów wzbogacenia największy efekt uzyskano przy jednoczesnym stosowaniu ligniny i nawożenia mineralnego LF (średnio 119%), a następnie LMF (średnio 107%), L (średnio 92%), LM (średnio 86%), F (średnio 48%), MF (średnio 44%) i M (średnio 15%). Fakt ten można wiązać z tym, że lignina to trwała materia organiczna, ulegająca bardzo powolnej mineralizacji. Jest ona substratem do budowy trwałej frakcji próchnicy, co z kolei prawdopodobnie przyczyniło się do poprawy właściwości słabej gleby, w tym być może do lepszego magazynowania wody i dostępności składników pokarmowych. Dzięki czemu w wariantach, w których zastosowano ligninę, rośliny miały lepsze warunki do wzrostu i rozwoju, w porównaniu do pozostałych obiektów. To z kolei przełożyło się na wyższe plony biomasy w obiektach z ligniną, które z kolei w głównej mierze determinowały wartość energetyczną plonu.



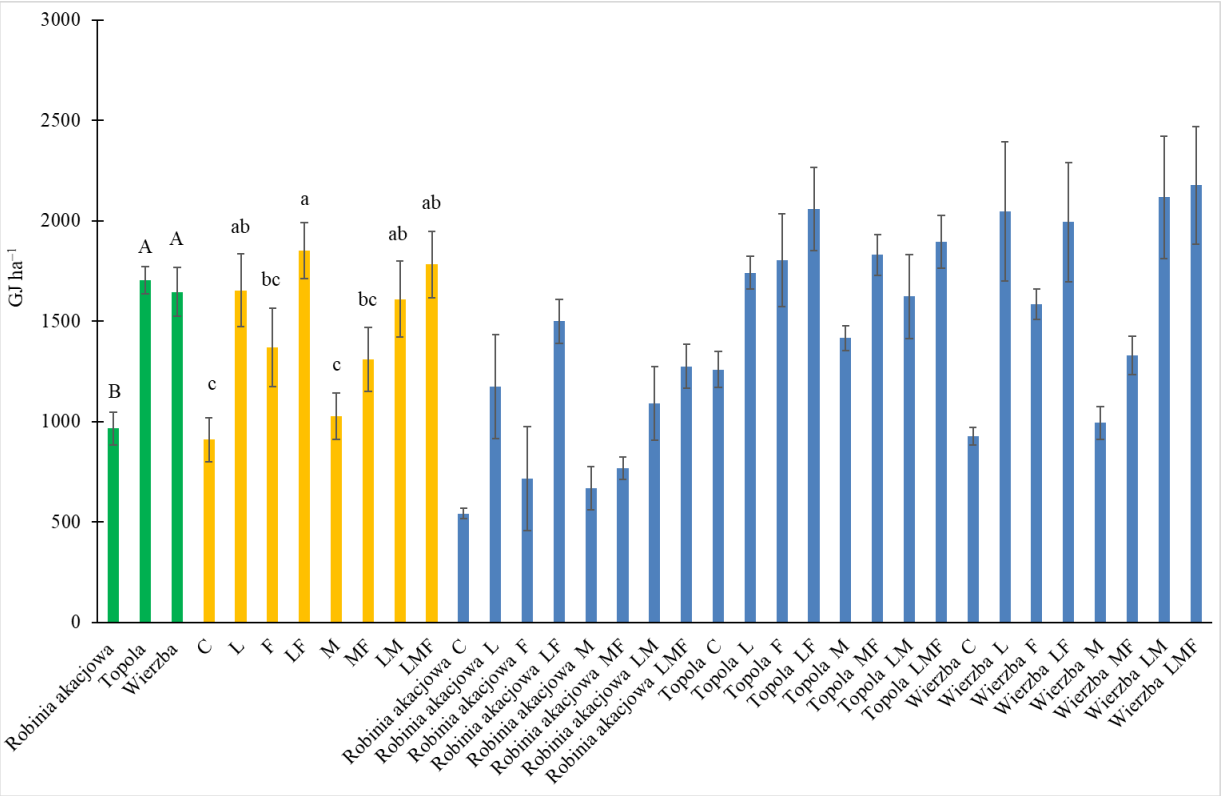
Rysunek. 3. Suma plonu suchej masy z 12 lat uprawy (z trzech kolejnych czteroletnich rotacji zbioru) w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby (Mg ha^{-1} s.m.); Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); A, B, C, itd. – grupy jednorodne dla gatunków; a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla sposobów wzbogacenia gleby; brak liter oznacza braku istotności; słupki błędów – słupki błędów – oznaczają błąd standardowy średniej (źródło: opracowanie własne)

Wartość energetyczną plonu SRWC, wynikająca z iloczynu wartości opałowej oraz plonu świeżej biomasy, była istotnie różnicowana (P<0,001) przez wszystkie trzy czynniki tj., gatunek SRWC, sposób wzbogacenia gleby i rotację zbioru oraz interakcję pomiędzy gatunkiem a rotacją zbioru (tab. 4). Jednakże największy udział w zmienności wartości energetycznej plonu miały gatunek SRWC 27,5% i sposób wzbogacenia gleby 25,7%, a rotacja zbioru 5,3% ogólnej wariancji. Spośród badanych gatunków SRWC najwyższą wartością energetyczną plonu (średnio 142,0 GJ ha^{-1} rok^{-1}) charakteryzowała się topola (tab. 6). Wartość energetyczna plonu wierzby była statystycznie na tym samym poziomie co topoli, ale była ona średnio o 3,4% niższa. Natomiast wartość energetyczna plonu robinii akacjowej (średnio 80,59 GJ ha^{-1} rok^{-1}) była istotnie niższa o 43,2% w porównaniu do topoli. Analiza sposobów wzbogacenia gleby wykazała, że najwyższą wartością energetyczną plonu (średnio 154,30 GJ ha^{-1} rok^{-1}) uzyskano w wariancie LF. Na kolejnych miejscach uplasowały się obiekty, w których również stosowano ligninę: LMF, L i LM (grupa jednorodna „ab"), a wartości tej cechy były średnio niższe odpowiednio o 3,7%; 10,7% i 13,0% w porównaniu do obiektu LF. Natomiast najniższe wartości energetyczne plonu uzyskano z obiektów M i C (grupa jednorodna „c") i były one niższe aż o odpowiednio 44,5% i 50,8% w porównaniu do wartości dla obiektu LF. Wartość energetyczna plonu wzrastała w kolejnych trzech czteroletnich rotacjach zbioru od średnio 103,44 przez 123,65 do 132,73 GJ ha^{-1} rok^{-1}, a więc w porównaniu do pierwszej rotacji zbioru był to wzrost o odpowiednio 19,5% i 28,3%. Należy tu jednak podkreślić, że wśród badanych gatunków SRWC występowały różnice, ponieważ topola w trzeciej rotacji zbioru charakteryzowała się najwyższą wartością tego parametru, średnio 153,75 GJ ha^{-1} rok^{-1} (grupa jednorodna „a"). W pośredniej grupie jednorodnej „abc i bc" znalazły się plony tego gatunku z drugiej i pierwszej rotacji zbioru i były one niższe o odpowiednio 7,5% i 15,5%. Również wartość energetyczna plonu wierzby znalazła się w pośredniej grupie jednorodnej, przy czym wierzba najwyższą wartość tej cechy osiągnęła w drugiej rotacji zbioru (średnio 146,68 GJ ha^{-1} rok^{-1}) i była ona o 4,6% niższa od najwyższej wartości dla topoli. Z kolei wartość energetyczna plonu robinii akacjowej była istotnie niższa w porównaniu do topoli i wierzby, szczególnie w pierwszej i drugiej rotacji zbioru. W przypadku robinii akacjowej wartość ta wzrastała od pierwszej, przez drugą do trzeciej rotacji zbioru, osiągając wtedy najwyższą wartość (112,59 GJ ha^{-1} rok^{-1}), która była o 26,8% niższa od najwyższej średniej wartości dla topoli. W związku z tym robinia akacjowa charakteryzowała się największymi zmianami procentowymi w zakresie wzrostu wartości energetycznej plonu w zależności od zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby (tab. 7). Generalnie zmiany tego parametru pomiędzy badanymi gatunkami i sposobami wzbogacenia

gleby układały się analogicznie do zmian wartości plonów biomasy. Należy również podkreślić, że najwyższą wartość energetyczną plonu w całym 12 letnim eksperymencie (średnio 195,14 GJ ha^{-1} rok^{-1}) uzyskano dla wierzby odmiany Żubr, uprawianej w wariancie LF w drugiej rotacji zbioru.

Tak jak całkowity plonu biomasy za okres 12 lat użytkowania plantacji, tak również ilość energii zgormadzonej w tej biomasie ma kluczowe znaczenie z praktycznego punktu widzenia. Z przeprowadzonych analiz wynika, że istotnie najwyższą całkowitą wartość energetyczną plonu z trzech kolejnych czteroletnich rotacji zbioru dała topola, średnio 1703,93 GJ ha^{-1} (rys. 4). Całkowita wartość energetyczna plonu wierzby była statystycznie na tym samym poziomie co topoli, ale była ona niższa średnio o 57,16 GJ ha^{-1}. Natomiast całkowita wartość energetyczna plonu robinii akacjowej była istotnie niższa o 736,91 GJ ha^{-1} w porównaniu do topoli. Trzeba podkreślić, że w przypadku tego parametru układ zależności pomiędzy badanymi gatunkami był podobny do tego jak to było w przypadku plonu biomasy, ale różnice pomiędzy topolą, a wierzbą i robinią akacjową zmniejszyły się o kilka pp.. Wynikało to z niższych wartości opałowych biomasy topoli w porównaniu do wierzby i robinii akacjowej. Analiza sposobów wzbogacenia gleby wykazała, że najwyższą całkowitą wartość energetyczną plonu z okresu 12 lat (średnio 1851,55 GJ ha^{-1}) uzyskano w wariancie LF. Podobnie jak w przypadku plonu biomasy, tak i w przypadku wartości energetycznej plonu na kolejnych miejscach uplasowały się obiekty, w których stosowano ligninę: LMF, L i LM (grupa jednorodna „ab") i wartości te były średnio niższe odpowiednio o 69,00; 197,47 i 240,68 GJ ha^{-1} w porównaniu do obiektu LF. Natomiast wartości energetyczne plonu uzyskane z obiektów M i C były niższe o odpowiednio 541,71 i 941,49 GJ ha^{-1} w porównaniu do wartości dla obiektu LF. Z kolei analizując wpływ zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby na wartość energetyczną plonu badanych gatunków SRWC, stwierdzono że najwyższą wartość tego parametru w całym eksperymencie uzyskano dla wierzby w obiekcie wzbogacenia gleby LMF (2176,95 GJ ha^{-1}). Ponad 2 tys. GJ ha^{-1} uzyskano również z uprawy wierzby w obiektach LM i L. Z kolei najwyższe całkowite wartości energetyczne plonu topoli i robinii akacjowej uzyskano w obiektach LF i były one niższe o odpowiednio 117,58 i 676,86 GJ ha^{-1} w porównaniu do najwyższej wartości uzyskanej dla wierzby. Trzeba również podkreślić, że badane gatunki SRWC, robinia akacjowa, topola i wierzba, dały najniższe całkowite wartości energetyczne plonu z obiektów kontrolnych (C) czyli bez żadnego sposobu wzbogacenia gleby, odpowiednio 542,83; 1259,99 i 927,36 GJ ha^{-1}. Tak więc zastosowane sposoby wzbogacenia gleby L, F, LF, M, MF, LM, LMF spowodowały wzrost całkowitych wartości energetycznych plonu badanych gatunków praktycznie w analogicznych wartościach procentowych tak jak to

miało miejsce w odniesieniu do plonów biomasy. Również średni wpływ zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby na wartość energetyczną plonu był analogiczny i w przypadku robinii akacjowej i wierzby wynosił średnio 78%, a w przypadku topoli było to średnio 35%. Ponadto spośród zastosowanych sposobów wzbogacenia największy pozytywny efekt w porównaniu do obiektów kontrolnych uzyskano w obiekcie LF (średnio 118%), a następnie LMF (średnio 107%), L (średnio 92%), LM (średnio 86%), F (średnio 49%), MF (średnio 43%), M (średnio 14%).



Rysunek 4. Suma wartości energetycznej plonu z 12 lat uprawy (z trzech kolejnych czteroletnich rotacji zbioru) w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby (GJ ha^{-1}); Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); A, B, C, itd. – grupy jednorodne dla gatunków; a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla sposobów wzbogacenia gleby; brak liter oznacza braku istotności; słupki błędów – słupki błędów – oznaczają błąd standardowy średniej (źródło: opracowanie własne)

4.4. Jakość dendromasy SRWC

Wybrane właściwości termofizyczne

Badane cechy termofizyczne jak: wilgotność, zawartość popiołu, zawartość części lotnych, węgla związanego, ciepło spalania i wartość opałowa biomasy drzewnej były istotnie różnicowane przez wszystkie czynniki główne: gatunek SRWC, sposób wzbogacenia gleby i rotację zbioru, jak również przez interakcje tych czynników (**P1** i **P2**). Przy czym zdecydowanie największy udział w zmienności wilgotności biomasy miał gatunek SRWC, który wynosił aż 93,8% ogólnej wariancji (**P2**). Biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się istotnie najniższą wilgotnością, średnio 38,89%, grupa jednorodna „c" (tab. 9). Wilgotność biomasy wierzby i topoli była istotnie wyższa o odpowiednio 27,9% i 45,3%. W odniesieniu do sposobów wzbogacenia gleby analiza statystyczna wykazała istotne różnice ale wszystkie analizowane warianty mieściły się w grupach jednorodnych od „a" przez „ab" do „b", a wilgotność zawierała się w bardzo wąskim przedziale od 48,11 do 48,70%. Nieznacznie większe różnice w wilgotności biomasy wystąpiły w odniesieniu do kolejnych rotacji zbioru, gdzie istotnie niższą wilgotność SRWC stwierdzono w trzeciej rotacji (średnio 47,08%), a w drugiej i pierwszej rotacji wartość ta była wyższa o odpowiednio 3,2% i 5,1%. Generalnie biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się niższą wilgotnością we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „f-g") w porównaniu do wierzby (grupa jednorodna „e-d") i topoli (grupa jednorodna „a-c"). Trzeba również dodać, że warunki pogodowe podczas zbioru roślin oraz bezpośrednio przed i po zbiorach mają również wpływ na wilgotność biomasy. Jest oczywistym, że opady atmosferyczne i duża wilgotność powietrza podczas zbioru przekładają się na wzrost wilgotność pozyskanej biomasy. W związku z tym wilgotność biomasy SRWC w literaturze może się często znacząco różnić, nawet w obrębie tych samych gatunków i technologii uprawy. Tym nie mniej faktem jest, że spośród trzech badanych w tej pracy gatunków SRWC, to robinia akacjowa miała zawsze najniższą, a topola najwyższą wilgotność (**P2**).

Zawartość popiołu, podobnie jak wilgotność, była najsilniej determinowana przez gatunek SRWC (prawie 61%), a następnie przez rotację zbioru (10%) i w mniejszym stopniu przez pozostałe czynniki i ich interakcje (**P2**). Spośród badanych gatunków SRWC najniższą zawartość popiołu oznaczono w biomasie wierzby, średnio 1,25% s.m. (tab. 9). Natomiast zawartość popiołu w biomasie robinii akacjowej i topoli była istotnie wyższa o odpowiednio 12,0% i 33,6%.

Tabela 9. Wybrane właściwości termofizyczne biomasy SRWC w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru (źródło: opracowanie własne)

Źródło zmienności	Wyszczególnienie	Wilgotność (%)	Zawartość popiołu (% s.m.)	Ciepło spalania (GJ Mg^{-1} s.m.)	Wartość opałowa (GJ Mg^{-1})
Gatunek (A)	Robinia akacjowa	38,89 c (6,5)	1,40 b (13,2)	19,46 c (0,8)	10,25 a (5,5)
	Topola	56,52 a (3,2)	1,67 a (9,7)	19,84 a (0,5)	6,80 c (5,5)
	Wierzba	49,75 b (2,0)	1,25 c (14,1)	19,63 b (0,5)	8,10 b (2,6)
Sposób wzbogacenia gleby (B)	C	48,11 b (16,4)	1,39 c (14,1)	19,66 ab (1,1)	8,44 a (18,2)
	L	48,51 ab (14,6)	1,47 abc (21,9)	19,62 ab (1,1)	8,34 ab (16,7)
	F	48,14 b (16,1)	1,50 a (14,9)	19,67 a (0,9)	8,44 a (18,3)
	LF	48,46 ab (15,9)	1,40 bc (20,0)	19,65 ab (1,0)	8,37 ab (18,2)
	M	48,40 ab (16,5)	1,47 ab (15,8)	19,61 b (1,0)	8,37 ab (18,8)
	MF	48,55 ab (15,8)	1,45 abc (14,2)	19,64 ab (1,0)	8,35 ab (18,1)
	LM	48,18 ab (15,4)	1,44 abc (18,6)	19,63 ab (1,1)	8,43 ab (17,5)
	LMF	48,70 a (15,5)	1,41 bc (17,5)	19,66 ab (0,9)	8,33 b (18,1)
Rotacja zbioru (R)	Pierwsza (R1)	49,49 a (11,5)	1,51 a (18,4)	19,60 b (1,3)	8,14 c (13)
	Druga (R2)	48,58 b (18,6)	1,49 a (11,8)	19,62 b (0,9)	8,36 b (21,5)
	Trzecia (R3)	47,08 c (15,6)	1,33 b (18,4)	19,71 a (0,6)	8,66 a (17,2)
A × B	Robinia akacjowa C	38,17 d (8,1)	1,37 bcd (13,4)	19,43 e (1,0)	10,37 a (6,6)
	Robinia akacjowa L	39,63 c (4,7)	1,49 bc (19,5)	19,41 e (1,0)	10,08 b (4,6)
	Robinia akacjowa F	38,59 cd (7,4)	1,47 bc (11,9)	19,52 de (0,5)	10,34 a (5,9)
	Robinia akacjowa LF	38,83 cd (6,3)	1,29 bcd (16,6)	19,47 de (0,9)	10,26 ab (5,3)
	Robinia akacjowa M	38,45 cd (7,9)	1,37 bcd (5,6)	19,42 e (0,8)	10,32 ab (6,4)
	Robinia akacjowa MF	39,10 cd (6,6)	1,43 bc (6,7)	19,45 e (0,6)	10,21 ab (5,5)
	Robinia akacjowa LM	38,87 cd (6,2)	1,40 bc (11,5)	19,48 de (1,0)	10,28 ab (5,6)
	Robinia akacjowa LMF	39,44 cd (6,3)	1,36 bcd (13,5)	19,51 de (0,8)	10,16 ab (5,6)
	Topola C	56,13 a (3,5)	1,55 ab (5,9)	19,87 a (0,4)	6,89 d (5,8)
	Topola L	56,26 a (1,8)	1,70 a (14,8)	19,85 a (0,4)	6,85 d (3,3)
	Topola F	56,59 a (3,1)	1,73 a (7,4)	19,86 a (0,5)	6,79 d (5,7)
	Topola LF	56,60 a (4,2)	1,70 a (11,2)	19,83 a (0,4)	6,77 d (7,4)
	Topola M	56,68 a (4,1)	1,71 a (4,8)	19,79 ab (0,5)	6,74 d (7,1)
	Topola MF	56,72 a (3,8)	1,66 a (7,3)	19,85 a (0,3)	6,75 d (6,4)
	Topola LM	56,20 a (1,5)	1,70 a (10,9)	19,84 a (0,6)	6,88 d (2,2)
	Topola LMF	56,96 a (3,6)	1,66 a (10,5)	19,80 a (0,5)	6,69 d (6,1)
	Wierzba C	50,02 b (1,5)	1,25 cd (14,1)	19,66 c (0,3)	8,05 c (2,0)
	Wierzba L	49,65 b (2,3)	1,21 cd (19,2)	19,59 cd (0,4)	8,09 c (2,8)
	Wierzba F	49,26 b (2,0)	1,30 bcd (8,8)	19,62 cd (0,5)	8,20 c (2,9)
	Wierzba LF	49,97 b (1,8)	1,19 d (7,8)	19,66 c (0,6)	8,09 c (2,4)
	Wierzba M	50,08 b (0,9)	1,34 bcd (19,8)	19,63 cd (0,5)	8,03 c (1,3)
	Wierzba MF	49,83 b (2,2)	1,26 cd (11,9)	19,62 cd (0,5)	8,09 c (3,1)
	Wierzba LM	49,46 b (2,4)	1,22 cd (16,5)	19,58 cd (0,6)	8,14 c (3,4)
	Wierzba LMF	49,69 b (2,2)	1,21 cd (10,0)	19,67 bc (0,6)	8,13 c (3,1)
A × R	Robinia akacjowa R1	42,13 f (1,1)	1,51 c (4,8)	19,33 f (0,4)	9,52 b (1,1)
	Robinia akacjowa R2	37,02 g (3,4)	1,39 d (12,7)	19,40 e (0,4)	10,64 a (2,3)
	Robinia akacjowa R3	37,51 g (3,2)	1,29 e (16,3)	19,65 c (0,6)	10,6 a (2,3)
	Topola R1	55,81 b (0,6)	1,83 a (6,0)	19,92 a (0,1)	6,99 f (1,0)
	Topola R2	58,75 a (1,8)	1,64 b (5,2)	19,79 b (0,3)	6,33 g (3,7)
	Topola R3	54,98 c (1,6)	1,55 c (9,4)	19,79 b (0,5)	7,07 f (2,8)
	Wierzba R1	50,53 d (0,6)	1,18 f (3,3)	19,54 d (0,2)	7,9 e (0,9)
	Wierzba R2	49,95 d (0,9)	1,42 d (9,2)	19,66 c (0,4)	8,1 d (1,2)
	Wierzba R3	48,75 e (2,0)	1,14 f (15,0)	19,70 c (0,4)	8,3 c (2,5)

Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności i ich interakcji oddzielnie dla każdej cechy; brak liter oznacza braku istotności; (współczynniki zmienności – %)

Wszystkie zastosowane sposoby wzbogacenia gleby wpłynęły na wzrost zawartości popiołu w biomasie SRWC w porównaniu do obiektów kontrolnych (grupa jednorodna „c"), chociaż różnice te nie zawsze były istotne statystycznie. Nieznacznie większe różnice w zawartości popiołu wystąpiły w odniesieniu do kolejnych rotacji zbioru, ponieważ istotnie wartość tej cechy stwierdzono w trzeciej rotacji (średnio 1,33 s.m.), a w drugiej i pierwszej rotacji wartość ta była wyższa o odpowiednio 12,0% i 13,5%. Generalnie biomasa topoli charakteryzowała się wyższą zawartością popiołu we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „a-c") w porównaniu do wierzby w przypadku której najniższą wartość tej cechy stwierdzono w trzeciej rotacji zbioru (1,14 s.m., grupa jednorodna „f"). Również z danych literaturowych wynika, że zawartość popiołu w biomasie SRWC może być bardzo zróżnicowana, od poniżej 1% do ponad 3% s.m. Pomimo tych dużych wahań w zawartości popiołu SRWC należy dodać, że wartości te i tak były niższe w porównaniu do zawartości popiołu w biomasie półzdrewniałej, słomie czy łupinach orzecha kokosowego (**P2**).

Ciepło spalania było najsilniej determinowane przez gatunek SRWC (62,6%), a następnie przez interakcję gatunku i rotacji zbioru (16,6%) i w mniejszym stopniu przez pozostałe czynniki i ich interakcje (**P2**). Biomasa topoli charakteryzowała się istotnie najwyższym ciepłem spalania, średnio 19,84 GJ Mg^{-1} s.m. (tab. 9). Wartość tej cechy dla biomasy wierzby i robinii akacjowej była nieznacznie ale istotnie niższa o odpowiednio 1,1% i 1,9%. Natomiast w odniesieniu do sposobów wzbogacenia gleby różnice ciepła spalania pomiędzy badanymi obiektami wynosiły poniżej 0,5%. Podobnie było w przypadku kolejnych rotacji zboru, gdzie istotnie wyższą wartość ciepła spalania stwierdzono w trzeciej rotacji (średnio 19,71 GJ Mg^{-1} s.m.), a w drugiej i pierwszej rotacji wartość ta była niższa o odpowiednio 0,5% i 0,6%. Biomasa topoli charakteryzowała się wyższymi wartościami ciepła spalania we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „a-b") w porównaniu do wierzby (grupa jednorodna „c-d") i robinii akacjowej (grupa jednorodna „c-f").

Zdecydowanie największy udział w zmienności wartości opałowej miał gatunek SRWC, który wynosił 92,4% ogólnej wariancji (**P1**). Biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się istotnie najwyższą wartością opałową, średnio 10,25 GJ Mg^{-1} (tab. 9). Wartość tej cechy dla biomasy wierzby i topoli była istotnie niższa o odpowiednio 21,0% i 33,7%. Wynikało to głównie z niższej wilgotności biomasy robinii akacjowej w porównaniu do wierzby i następnie topoli, której wilgotność była najwyższa. Co prawda w odniesieniu do sposobów wzbogacenia gleby analiza statystyczna wykazała istotne różnice ale wszystkie analizowane warianty mieściły się w grupach jednorodnych od „a" przez „ab" do „b", a wartość opałowa zawierała się w wąskim przedziale od 8,33 do 8,44 GJ Mg^{-1}. Nieznacznie większe

różnice wartości opałowej wystąpiły w odniesieniu do kolejnych rotacji zboru, gdzie istotnie wyższą wartość opałową stwierdzono w trzeciej rotacji (średnio 8,66 GJ Mg^{-1}), a w drugiej i pierwszej rotacji wartość ta była niższa o odpowiednio 3,5% i 6,0%. Biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się wyższymi wartościami opałowymi we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „a-b") w porównaniu do wierzby (grupa jednorodna „c-e") i topoli (grupa jednorodna „f-g").

Skład elementamy

Zawartość węgla (C), wodoru (H), azotu (N), siarki (S) i chloru (Cl) w biomasie były istotnie różnicowane przez wszystkie czynniki główne: gatunek SRWC, sposób wzbogacenia gleby i rotację zbioru, jak również przez większość interakcji tych czynników (**P2**). Przy czym największy udział w zmienności zawartości C, H i Cl miała rotacja zbioru, odpowiednio 83,9%, 73,3% i 28,3% ogólnej wariancji, co było pewnego rodzaju zaskoczeniem. Natomiast w przypadku zawartości N zdecydowanie największy udział w zmienności tej cechy miał gatunek SRWC (81,3%). Gatunek SRWC miał również swój udział w zmienności zawartości S (20,5%) ale jeszcze większy udział miała tu interakcja gatunku, rotacji zbioru i sposobu wzbogacenia gleby (22,4%), a następnie interakcja gatunku i sposobu wzbogacenia gleby (10,1%).

Biomasa topoli i wierzby charakteryzowała się istotnie wyższą zawartością C, średnio ponad 53,2% s.m. grupa jednorodna „a", w porównaniu do robinii akacjowej (tab. 10). W odniesieniu do sposobów wzbogacenia gleby analiza statystyczna wykazała różnice ale wszystkie analizowane warianty mieściły się w grupach jednorodnych od „a" przez „ab" do „b", a zawartość C zawierała się w przedziale od 52,69 do 53,41% s.m. Większe różnice w zawartości C w biomasie SRWC wystąpiły w odniesieniu do kolejnych rotacji zbioru, gdzie istotnie wyższą wartość tej cechy stwierdzono w drugiej i trzeciej rotacji (ponad 54,4% s.m.), a pierwszej rotacji wartość ta była niższa o ok. 7,5%. Generalnie biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się niższą zawartością C we wszystkich rotacjach zbioru w porównaniu do wierzby i topoli.

Tabela 10. Skład elementarny biomasy SRWC w zależności od gatunku i sposobu wzbogacenia gleby w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru (źródło: opracowanie własne)

Źródło zmienności	Wyszczególnienie	C (% s.m.)	S (% s.m.)	N (% s.m.)	Cl (% s.m.)
Gatunek (A)	Robinia akacjowa	52,60 b (4,0)	0,033 a (23,6)	0,91 a (19,8)	0,032 a (48,7)
	Topola	53,46 a (3,7)	0,025 b (26,5)	0,43 b (16,8)	0,027 b (22,7)
	Wierzba	53,25 a (3,9)	0,026 b (26,1)	0,38 c (12,7)	0,019 c (42,6)
Sposób wzbogacenia gleby (B)	C	53,33 a (3,8)	0,029 abc (28,3)	0,56 bc (41,7)	0,023 c (38,3)
	L	53,16 ab (4,0)	0,028 abc (31,2)	0,61 a (51,9)	0,025 bc (42,6)
	F	52,69 b (3,8)	0,032 a (31,5)	0,60 ab (44,8)	0,024 c (50,1)
	LF	52,93 ab (4,0)	0,027 bc (18,9)	0,54 c (41,7)	0,029 a (43,2)
	M	53,17 ab (3,9)	0,027 bc (19,9)	0,55 bc (49,2)	0,027 ab (49,1)
	MF	53,05 ab (3,9)	0,027 bc (30,0)	0,59 ab (49,1)	0,025 bc (37,6)
	LM	53,41 a (4,3)	0,025 c (24,5)	0,60 ab (44,1)	0,025 bc (44,7)
	LMF	53,08 ab (3,9)	0,029 ab (32,1)	0,55 bc (49,0)	0,029 a (56,2)
Rotacja zbioru (R)	Pierwsza (R1)	50,42 b (1,2)	0,027 b (29,5)	0,62 a (50,0)	0,025 b (20,1)
	Druga (R2)	54,49 a (1,5)	0,030 a (27,4)	0,58 b (44,8)	0,034 a (40,5)
	Trzecia (R3)	54,40 a (1,9)	0,027 b (26,8)	0,52 c (40,7)	0,019 c (53,7)
A × B	Robinia akacjowa C	52,72 abcd (3,8)	0,036 ab (23,7)	0,85 cd (17,2)	0,023 de (45,1)
	Robinia akacjowa L	52,38 cd (4,0)	0,028 bcd (39,7)	0,98 a (28,9)	0,033 bc (23,4)
	Robinia akacjowa F	52,08 d (4,2)	0,039 a (25,5)	0,94 abc (18,2)	0,030 bcd (53,8)
	Robinia akacjowa LF	52,43 cd (4,3)	0,030 abc (15,7)	0,81 d (22,5)	0,036 ab (40,0)
	Robinia akacjowa M	53,12 abcd (4,3)	0,031 abc (10,5)	0,90 abc (15,5)	0,032 bc (65,0)
	Robinia akacjowa MF	52,76 abcd (4,4)	0,036 ab (21,0)	0,98 a (12,3)	0,032 bc (36,6)
	Robinia akacjowa LM	52,75 abcd (4,4)	0,031 abc (20,0)	0,95 ab (7,2)	0,031 bcd (50,9)
	Robinia akacjowa LMF	52,58 bcd (4,1)	0,032 bcd (11,9)	0,87 bcd (26,6)	0,042 a (54,0)
	Topola C	53,46 abc (3,7)	0,026 bcd (26,9)	0,41 efg (13,0)	0,026 cd (22,4)
	Topola L	53,67 ab (3,3)	0,029 bcd (32,4)	0,48 e (21,7)	0,030 bcd (20,0)
	Topola F	52,95 abcd (3,4)	0,030 bcd (32,4)	0,42 efg (10,7)	0,027 cd (22,5)
	Topola LF	53,62 ab (4,0)	0,025 bcd (6,5)	0,44 efg (12,4)	0,030 bcd (30,9)
	Topola M	53,12 abcd (4,2)	0,024 bcd (27,5)	0,39 fg (8,2)	0,028 cd (14,4)
	Topola MF	53,32 abc (4,1)	0,021 d (8,9)	0,43 efg (7,5)	0,021 de (18,9)
	Topola LM	53,68 ab (4,0)	0,022 cd (17,5)	0,47 ef (24,7)	0,024 cd (10,7)
	Topola LMF	53,83 a (4,1)	0,022 cd (12,9)	0,41 efg (15,9)	0,027 cd (20,4)
	Wierzba C	53,82 a (4,1)	0,024 bcd (13,1)	0,41 efg (15,7)	0,019 def (47,1)
	Wierzba L	53,42 abc (4,6)	0,026 (19,3)	0,38 fg (11,9)	0,013 def (38,7)
	Wierzba F	53,06 abcd (3,9)	0,026 bcd (19,6)	0,42 efg (11,2)	0,016 def (50,9)
	Wierzba LF	52,75 abcd (3,9)	0,026 bcd (24,6)	0,37 g (6,7)	0,021 de (46,5)
	Wierzba M	53,28 abc (3,6)	0,025 bcd (8,3)	0,35 g (14)	0,022 de (35,1)
	Wierzba MF	53,08 abcd (3,6)	0,024 bcd (20,7)	0,37 g (14,1)	0,022 de (33,5)
	Wierzba LM	53,79 a (4,8)	0,022 cd (14,5)	0,38 fg (10,7)	0,020 de (41,6)
	Wierzba LMF	52,82 abcd (3,4)	0,033 abc (41,3)	0,36 g (5,1)	0,019 def (37,7)
A × R	Robinia akacjowa R1	49,76 (0,5)	0,034 a (27,8)	1,05 a (5,0)	0,030 b (16,4)
	Robinia akacjowa R2	54,16 (1,4)	0,033 a (15,9)	0,90 b (20,6)	0,049 a (24,7)
	Robinia akacjowa R3	53,89 (1,3)	0,031 ab (25,3)	0,78 c (20,9)	0,018 e (41,3)
	Topola R1	50,96 (0,6)	0,024 d (11,8)	0,44 de (5,0)	0,024 d (12,1)
	Topola R2	54,75 (1,3)	0,028 bc (28,5)	0,47 d (19,0)	0,028 bc (22,6)
	Topola R3	54,65 (2,5)	0,024 d (30,8)	0,39 f (17,7)	0,028 bc (25,1)
	Wierzba R1	50,53 (0,7)	0,022 d (10,2)	0,37 f (11,9)	0,022 d (14,7)
	Wierzba R2	54,55 (1,7)	0,029 bc (34,8)	0,38 f (11,4)	0,025 cd (22,2)
	Wierzba R3	54,67 (1,4)	0,026 cd (13,2)	0,40 ef (13,7)	0,010 f (48,3)

Sposób wzbogacenia gleby: kontrola bez żadnego wzbogacania gleby (C), zastosowanie ligniny (L), nawożenie mineralne (F), lignina + nawożenie mineralne (LF), zastosowanie szczepionki mikoryzowej (M), mikoryza + nawożenie mineralne (MF), lignina + mikoryza (LM); lignina + mikoryza + nawożenie mineralne (LMF); a, b, c, itd. – grupy jednorodne dla głównego źródła zmienności i ich interakcji oddzielnie dla każdej cechy; brak liter oznacza braku istotności; (współczynniki zmienności – %)

Biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się istotnie wyższą zawartością S, średnio 0,033% s.m. (tab. 10). Wartość tej cechy dla biomasy wierzby i topoli była istotnie niższa o odpowiednio 21,2% i 24,2%. Spośród zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby istotnie wyższą zawartość S (średnio 0,032% s.m.) stwierdzono w obiekcie, w którym zastosowano nawożenie mineralne (F). Natomiast w pozostałych wariantach wzbogacenia gleby wartość tej cechy była niższa w zakresie 9-22%. W drugiej rotacji zbioru średnia zawartość siarki w biomasie SRWC była o 10% wyższa w porównaniu do pierwszej i trzeciej rotacji zbioru. Trzeba dodać, że generalnie biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się wyższą zawartością S we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „a-ab") w porównaniu do topoli i wierzby. Biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się również istotnie wyższą zawartością N i Cl, średnio odpowiednio 0,91% s.m. i 0,032% s.m. Z kolei najniższe zawartości tych pierwiastków stwierdzono w biomasie wierzby, a pośrednie w biomasie topoli. Zawartość N w biomasie topoli i wierzby była odpowiednio niższa średnio aż o 52,7% i 58,2%. Natomiast w przypadku zawartości Cl różnice te były niższe i wynosiły odpowiednio 15,6% i 40,6%. Zastosowanie ligniny do wzbogacenia gleby wpłynęło na wzrost zawartości N w biomasie SRWC (średnio 0,61% s.m.), a w obiekcie kontrolnym wartość ta była niższa o 8%. Stwierdzono również, że średnia zawartość azotu w biomasie istotnie obniżała się w kolejnych rotacjach zbioru, ponieważ w pierwszej rotacji zbioru wynosiła ona średnio 0,62% s.m., a w drugiej i trzeciej rotacji była ona niższa o odpowiednio 6,5% i 17,1%. Trzeba dodać, że generalnie biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się wyższą zawartością N we wszystkich rotacjach zbioru (grupa jednorodna „a-c") w porównaniu do topoli (grupa jednorodna „d-f") i wierzby (grupa jednorodna „e-f"). Również w badaniach realizowanych w cieplejszym klimacie robinia akacjowa charakteryzowała się wyższą zawartością N i Cl, odpowiednio: 0,63 i 0,02% s.m., w porównaniu do wierzby i topoli. W przypadku wierzby zawartość azotu była niższa o 27%, a w przypadku topoli aż o 75%. Natomiast najniższą zawartość chloru w cytowanych badaniach stwierdzono w biomasie wierzby. W innych badaniach zawartość analizowanych pierwiastków w biomasie SRWC była zróżnicowana w zależności od warunków klimatycznych i stosowanych czynników agrotechnicznych (**P2**).

4.5. Właściwości peletu z mieszanin biomasy rolniczej i leśnej

Właściwości termofizyczne

Większość analizowanych właściwości termofizycznych peletów jak: gęstość nasypowa, długość, wytrzymałość mechaniczna, zawartość frakcji drobnej, zawartość części lotnych i stałych, zawartość popiołu, ciepło spalania, wartość opałowa jak również ich skład elementarny były istotnie różnicowane przez rodzaj biomasy (P<0,001), oprócz wilgotności (P=0,065) (tab. 11).

Tabela 11. Analiza wariancji (wartości F i P) dla badanych cech (źródło: opracowanie własne)

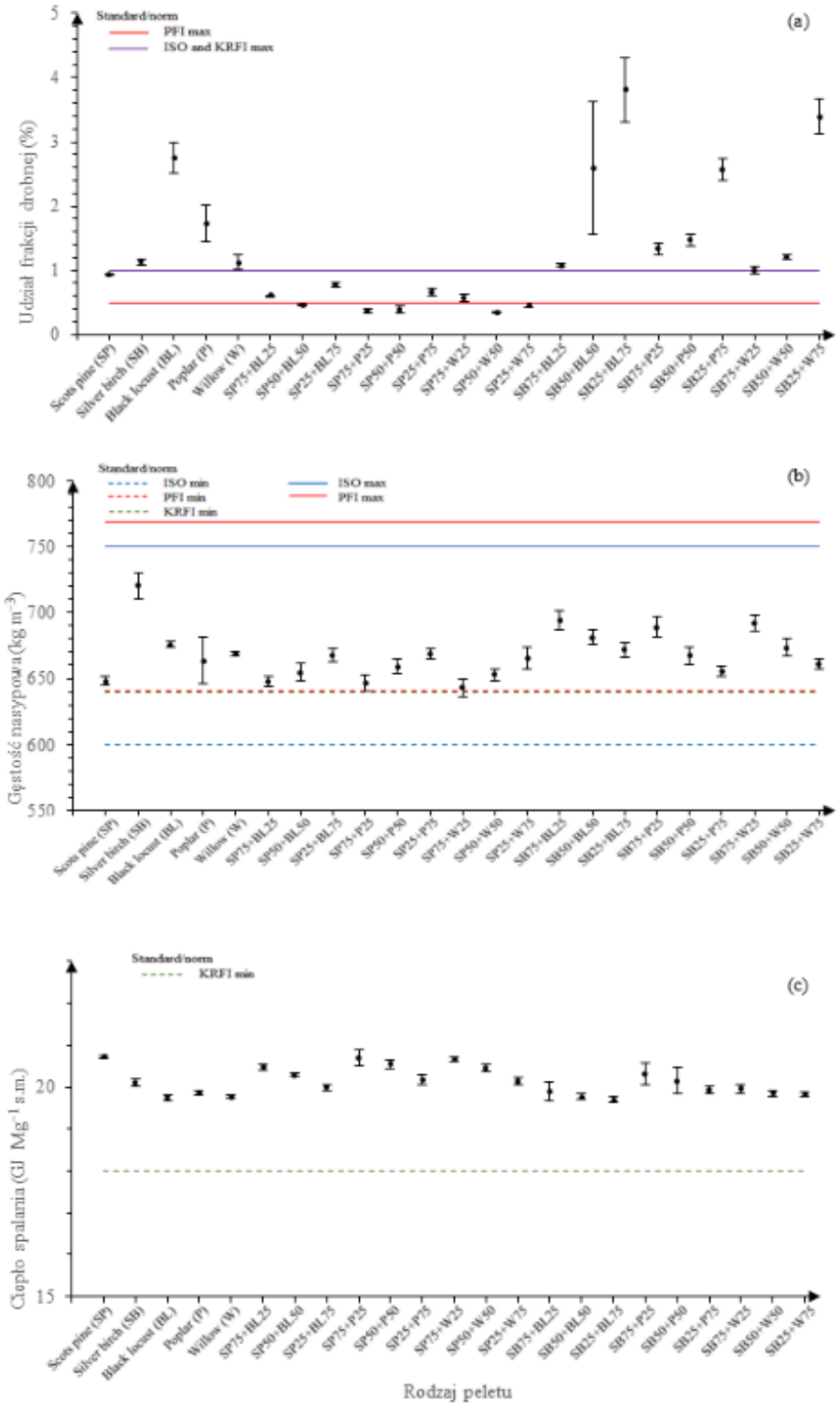
Cecha	F	P
Długość	21,89	<0,001*
Gęstość nasypowa	21,28	<0,001*
Wytrzymałość mechaniczna	43,17	<0,001*
Udział frakcji drobnej	43,17	<0,001*
Wilgotność	1,70	0,065
Zawartość popiołu	110,75	<0,001*
Zawartość części lotnych	15,75	<0,001*
Zawartość węgla związanego	5,43	<0,001*
Ciepło spalania	21,11	<0,001*
Wartość opałowa	22,54	<0,001*
Gęstość energii	8,32	<0,001*
C	10,18	<0,001*
H	6,71	<0,001*
N	125,55	<0,001*
S	32,69	<0,001*
Cl	1,85	0,040*

* wartości istotne (P<0,05)

Pelet wierzbowy z biomasy rolniczej SRWC charakteryzował się istotnie największą długością, 20,2 mm przy odchyleniu standardowym 0,7 mm (**P3**). Z kolei pelet sosnowy z biomasy leśnej był najkrótszy 12,4 mm, przy odchyleniu standardowym 0,4 mm. Z kolei długość peletów z mieszaniny biomasy rolniczej i leśnej zawierała się w zakresie 14,5–17,2 mm. Długość wszystkich badanych peletów mieściła się w zakresie wskazywanym przez normy jakościowe. Trzeba również dodać, że długości peletów mieściły się w przedziale wartości uzyskiwanych w innych badaniach, w których długość peletu była zróżnicowana i dochodziła do ponad 60 mm (**P3**). Natomiast długość peletu w stanie surowym może osiągać wartość do 100 mm. Jest ona uzależniona również od warunków kondycjonowania oraz wilgotności surowca, gdzie przyjmuje się, że długość peletu może być większa w przypadku

wykorzystania wilgotniejszego surowca. Z kolei w warunkach produkcyjnych długość peletu może być regulowana przez długość otworów w matrycy oraz noże tnące znajdujące się za matrycą. W badaniach w ramach tej rozprawy doktorskiej noże tnące były zdemontowane, co wymuszało samoistne odłamywanie się peletów z matrycy i umożliwiło określenie zróżnicowania długości peletów z badanych rodzajów biomasy. Trzeba również dodać, że długość peletu jest istotna z praktycznego punktu widzenia, ponieważ krótsze pelety umożliwiają łatwiejsze i bardziej równomierne ich przemieszczanie przez ślimak podajnika kotła do spalania tego biopaliwa stałego. A to z kolei może wpływać na obniżenie temperatury spalania w kotle oraz temperatury spalin, ponieważ przy krótszych peletach występuje większy stosunek powierzchni do objętości, a więc większa powierzchnia tego paliwa podlega spalaniu, dzięki czemu sam proces spalania może być efektywniejszy. Również średnica peletu jest uzależniona od średnicy otworów w wykorzystanej do peletyzacji matrycy. W tych badaniach średnica wyprodukowanego peletu wynosiła 6 mm i mieściła się w zakresie wskazywanym przez normy jakościowe. Natomiast w innych badaniach wartość tej cechy zawierała się w zakresie od 4 do nawet 20 mm. Ten parametr peletu jest również ważny, ponieważ wraz ze zmniejszaniem się średnicy następuje wzrost gęstości nasypowej, dzięki czemu można przechowywać większą masę tego biopaliwa stałego w tej samej objętości w porównaniu do peletu charakteryzującego się większą średnicą. Ponadto generalnie im większy stosunek długości peletu do jego średnicy, tym potencjalnie mniejsza może być wytrzymałość mechaniczna tego biopaliwa stałego (**P3**).

W badaniach najwyższą wytrzymałością mechaniczną charakteryzował się pelet sosnowy 99,1% (**P3**), u którego stosunek długości do średnicy był najniższy (2,05). Wytrzymałość mechaniczna pozostałych peletów z samej biomasy leśnej lub rolniczej była niższa (97,3–98,9%), chociaż nie były to statystycznie istotne różnice, a stosunek długości do średnicy był wyższy i zawierał się w zakresie 2,3–3,4. Z kolei wytrzymałość mechaniczna peletów z biomasy mieszanej zawierała się w szerszym zakresie od 96,2% do 99,7%, odpowiednio dla peletów SB25+BL75 i SP50+W50. Dlatego też pelet o najniższej wytrzymałości mechanicznej (SB25+BL75) nie spełniał wymagań dla tego parametru w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium żadnej z trzech norm ISO, PFI oraz KFRI (**P3**). Ponadto trzeba dodać, że cztery inne pelety z biomasy robinii akacjowej, SB50+BL50, SB25+P75 i SB25+W75 nie spełniały wymagań w odniesieniu do norm KFRI i ISO. Natomiast pozostałe 18 rodzajów peletu spełniało wymagania wszystkich trzech norm w odniesieniu do tej cechy. W związku z powyższym zawartość frakcji drobnej zawierała się w zakresie od 0,34 do 3,81% odpowiednio dla peletów z SP50+W50 i SB25+BL75 (**P3**).



Rysunek 5. Udział frakcji drobnej (a), gęstość nasypowa (b) i ciepło spalania (c) badanych peletów w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnych trzech klas peletów A1, Premium i Grade 1 z norm jakościowych, odpowiednio: ISO, PFI i KFRI (źródło: opracowanie własne)

Stwierdzono również generalnie, że wytrzymałość mechaniczna peletów z biomasy iglastej sosny i jej mieszanin z biomasą liściastą pochodzenia rolniczego SRWC była wyższa (a tym samym udział frakcji drobnej był niższy) w porównaniu do samej biomasy liściastej pochodzenia leśnego i rolniczego lub jej mieszanin. Tym nie mniej w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium normy KFRI (≤0,5% udział frakcji drobnej) warunek ten spełniało tylko pięć rodzajów peletu, a w odniesieniu do normy ISO było to dziesięć rodzajów peletu (rys. 5a).

Istotnie najwyższą gęstością nasypową (720,3 kg m^{-3}) charakteryzował się pelet brzozowy przy odchyleniu standardowym na poziomie 10,5 kg m^{-3} (rys. 5b). Z kolei gęstość nasypowa peletu z biomasy leśnej drugiego gatunku, czyli sosny była istotnie niższa o około 72 kg m^{-3}, ale dalej spełniała najbardziej restrykcyjne kryteria dla klas peletów wg norm ISO, PFI i KFRI. Spośród peletów z biomasy SRWC najwyższą gęstością nasypową charakteryzował się pelet robinii akacjowej (675,9 kg m^{-3}), następnie wierzby i topoli. Przy czym pelet z topoli charakteryzował się ponadto najwyższym odchyleniem standardowym (17,7 kg m^{-3}). Trzeba dodać, że zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy sosny powodowało generalnie wzrost gęstości nasypowej peletów powstałych z tych mieszanin. Natomiast w przypadku mieszanin biomasy SRWC z brzozą sytuacja była odwrotna, ponieważ zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC powodowało generalnie spadek gęstości nasypowej peletów powstałych z tych mieszanin. Ponadto pelety z mieszaniny biomasy brzozy i SRWC charakteryzowały się wyższą gęstością (zakres 655–694 kg m^{-3}) w porównaniu do ich odpowiedników powstałych z mieszaniny z biomasą sosny (zakres 643–669 kg m^{-3}), chociaż różnice te nie zawsze były istotne statystycznie. Pomimo tego zróżnicowania trzeba podkreślić, że średnie wartości gęstości nasypowej wszystkich rodzajów peletu spełniały najbardziej restrykcyjne kryteria dla najwyższych klas peletów wg norm ISO, PFI i KFRI (rys. 5b). Natomiast w przypadku dwóch rodzajów peletów (SP75+P25 i SP75+W25) odchylenie standardowe wskazało, że istnieje ryzyko niespełnienia najniższej dopuszczalnej wartości względem norm PFI i KFRI, przez część tych peletów i w efekcie potencjalne nieposiadanie przez te pelety najwyższej klasy jakości. Natomiast względem normy ISO nie było takiego zagrożenia. Również w innych badaniach (Stolarski i in. 2022a) gęstość nasypowa peletu brzozowego (702 kg m^{-3}) była wyższa niż sosnowego (671 kg m^{-3}), chociaż w porównaniu do naszych badań wartości te były odpowiednio niższa i wyższa. Zbliżone do naszych badań wartości gęstości nasypowej peletu sosnowego (647–650 kg m^{-3}) uzyskano w badaniach Núñez-Retana i in. (2020) i Miranda i in. (2015). Z kolei pelet wyprodukowany z jednorocznych pędów wierzby i topoli (odpowiednio

523 i 499 kg m^{-3}) charakteryzował się niższymi gęstościami nasypowymi (Stolarski i in. 2022b) w porównaniu do peletów z czteroletnich pędów tych gatunków w naszych badaniach. Również w innych badaniach gęstość nasypowa peletu z biomasy topoli wynosiła poniżej 500 kg m^{-3} (Monedero i in. 2015).

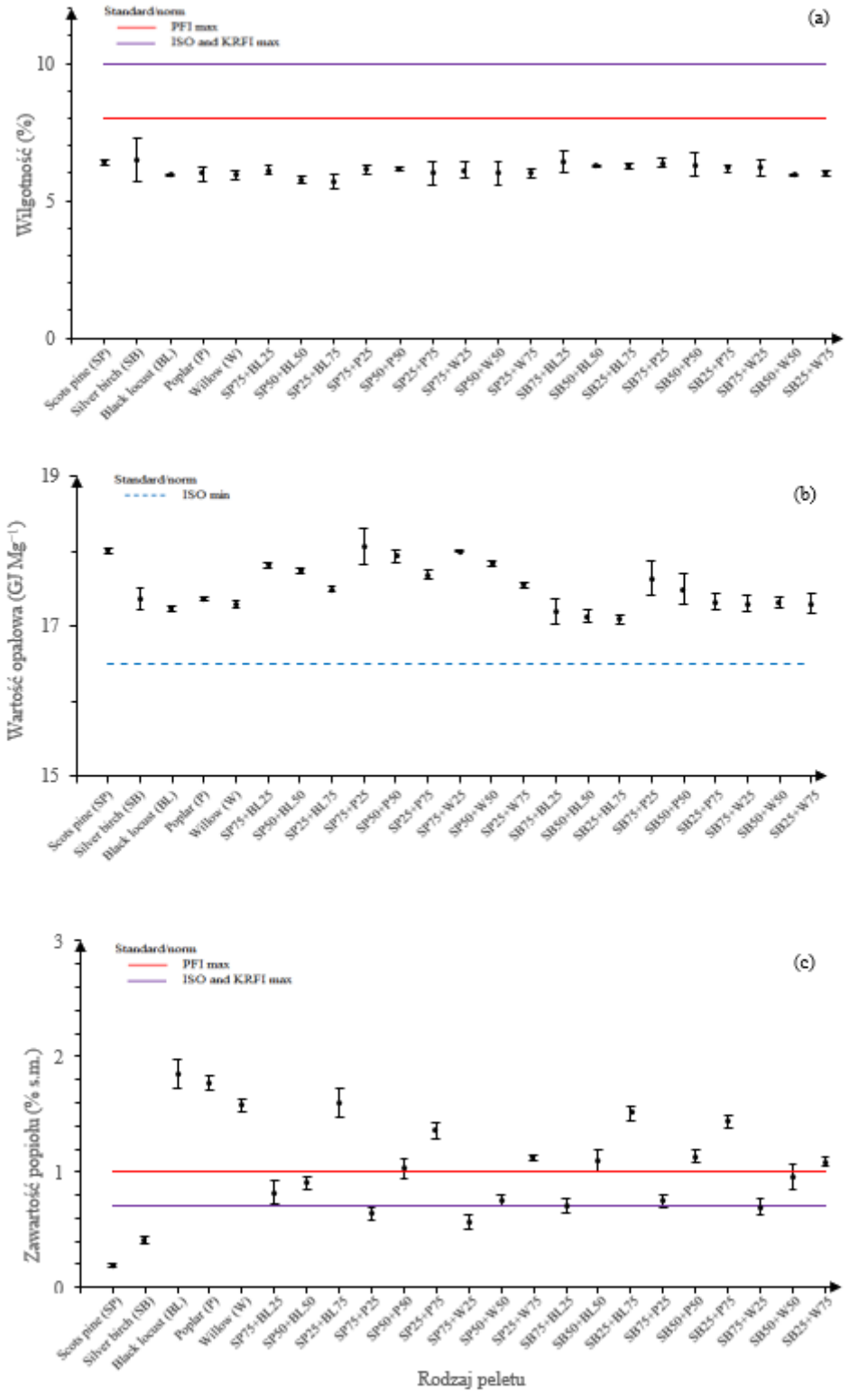
Pelet z trocin drewna iglastego sosnowego charakteryzował się najwyższym ciepłem spalania, średnio 20,73 MJ kg^{-1} s.m. (rys. 5c). Również ciepło spalania peletu brzozowego wynosiła ponad 20 MJ kg^{-1} s.m., ale było jednak niższe o ok. 3%. Z kolei wartość tego parametru dla peletów z SRWC zawierała się w zakresie 19,75-19,86 MJ kg^{-1} s.m., a więc były to wartości niższe o 4-5% w porównaniu do najwyższego ciepła spalania peletu sosnowego. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało generalnie spadek ciepła spalania peletów powstałych z tych mieszanin, z wyjątkiem peletu SB75+P25 i SB75+P50. W przypadku mieszanin biomasy sosny z SRWC obniżenie ciepła spalania zawierało się w zakresie od 0,1 do 3,6%. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC obniżenie tego parametru zawierało się w zakresie od 0,8 do 2,0%, a w pelecie SB75+P25 był to wzrost o 1%. Wartości ciepła spalania wszystkich rodzajów peletu spełniały najbardziej restrykcyjne kryterium dla klasy peletów wg normy KFRI (rys. 5c). W tych badaniach ciepło spalania było istotnie dodatnio skorelowane z zawartością węgla (0,59) oraz istotnie ujemnie skorelowane z zawartością popiołu (-0,63), azotu (-0,66), siarki (-0,74) i chloru (-0,37) (**P3**). O ile korelacja dodatnia ze stężeniem węgla oraz korelacja ujemna z zawartością popiołu i azotu nie dziwi, to ujemna korelacja ciepła spalania z zawartością siarki jest ewidentnie korelacją pozorną, ponieważ przyjmuje się, że ciepło spalania jest dodatnio skorelowane z zawartością siarki. Podobne zależności w zakresie zróżnicowania ciepła spalania różnych rodzajów peletu stwierdzono w danych literaturowych (**P3**).

Wilgotność peletów zawierała się w bardzo wąskim przedziale od 5,7 do 6,5% i nie była istotnie zróżnicowana statystycznie pomiędzy rodzajami biomasy. W związku z tym pod względem tej cechy wszystkie pelety spełniały najbardziej restrykcyjne kryterium norm ISO, KFRI, PFI (rys. 6a). Po uwzględnieniu wilgotności i zawartości wodoru w pelecie stwierdzono, że tylko w przypadku trzech rodzajów peletu (SP, SP75+P25, SP75+W25) wartość opałowa osiągnęła lub przekroczyła wartość 18,0 MJ kg^{-1} (rys. 6b). Natomiast wartość opałowa peletu tylko z biomasy brzozy lub SRWC zawierała się w zakresie od 17,23 do 17,36 MJ kg^{-1}, odpowiednio dla robinii akacjowej oraz brzozy i topoli. Wartości te były niższe o ok. 4% w porównaniu do wartości opałowej peletu sosnowego. Zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało

spadek wartości opałowej peletów powstałych z tych mieszanin (oprócz SP75+P25) do maksymalne 2,8%. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC obniżenie wartości opałowej wynosiło maksymalnie 1,6%, a w peletach SB75+P25 i SB50+P50 był to wzrost o odpowiednio 1,6% i 0,7%. Wartości opałowe wszystkich rodzajów peletu spełniały najbardziej restrykcyjne kryterium dla klasy peletów A1 (≥16,5 MJ kg^{-1}) wg normy ISO (rys. 6b). Również w innych badaniach (Stolarski i in. 2022a) pelet sosnowy charakteryzował się najwyższą wartością opałową (17,69 MJ kg^{-1}) spośród siedmiu rodzajów peletu, a wartość tego parametru dla peletu brzozy wyniosła 16,58 MJ kg^{-1}. Wyższe wartości opałowe peletu brzozowego (17,87 MJ kg^{-1}) uzyskano w badaniach, w których przy obliczaniu tego parametru nie uwzględniono zawartości wodoru (Zawiślak i in. 2020). Również pelet z trzyletnich pędów topoli charakteryzował się wyższą wartością opałową (17,67 MJ kg^{-1}), ale również bez uwzględnienia przy obliczeniu tego parametru zawartości wodoru (Civitarese i in. 2019). Natomiast wartość opałowa peletu z jednorocznych pędów topoli i wierzby przy uwzględnianiu zawartości wodoru wynosiła odpowiednio 17,1 i 17,2 MJ kg^{-1} (Stolarski i in. 2022b).

Po uwzględnieniu gęstości nasypowej peletu stwierdzono, że najwyższą wartością gęstością energii (12,51 GJ m^{-3}) charakteryzował się pelet brzozowy (**P3**). Wartość ponad 12 GJ m^{-3} stwierdzono jeszcze tylko w przypadku peletu mieszanego SB75+P25. Natomiast w przypadku pozostałych czterech rodzajów czystej biomasy leśnej i SRWC wartość tego parametru zawierała się w zakresie 11,52–11,67 GJ m^{-3}. Z kolei w przypadku mieszanin biomasy sosny i SRWC gęstość energii zawierała się w zakresie 11,55–11,82 GJ m^{-3}, a w mieszaninach z brzozą był to zakres 11,35–11,98 GJ m^{-3}.

Pelet z biomasy wszystkich gatunków SRWC charakteryzował się zdecydowanie istotnie wyższą zawartością popiołu w porównaniu do biomasy leśnej (rys. 6c). Najwyższą wartość tego parametru (1,85% s.m.) stwierdzono w pelecie robinii akacjowej. W pozostałych dwóch peletach SRWC, czyli topoli i wierzbie zawartość popiołu była niższa o odpowiednio 3,8 i 14,6%. Natomiast zawartość popiołu w pelecie brzozowym (0,40% s.m.) i sosnowym (0,19% s.m.) była niższa aż o odpowiednio 78 i 90% w porównaniu do robinii akacjowej. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało wzrost zawartości popiołu w peletach powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin sosny i robinii akacjowej był to wzrost w zakresie aż od 332 do 742%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie od 237 do 616%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 200 do 489%.



Rysunek 6. Wilgotność (a), wartość opałowa (b) i zawartość popiołu (c) badanych peletów w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnych trzech klas peletów A1, Premium i Grade 1 z norm jakościowych, odpowiednio: ISO, PFI i KFRI (źródło: opracowanie własne)

Z kolei dodawanie do trocin brzozowych biomasy robinii akacjowej powodowało wzrost zawartości popiołu w wyprodukowanym pelecie w zakresie od 76 do 278%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie od 85 do 258%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 75 do 173%. W związku z powyższym w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium (≤0,7% s.m.) dla klasy peletów A1 wg normy ISO i Grade 1 wg normy KFRI warunek ten w pełni spełniły tylko cztery rodzaje peletów tj. sosnowy, brzozowy, SP75+W25 i SP75+P25, ponieważ średnia zawartość popiołu jak i wartości odchylenia standardowego nie przekraczały zawartości 0,7% s.m. (rys. 6c). Z kolei analizując wartości odchylenia standardowego można wnioskować, że również inne trzy pelety SB75+BL25, SB75+P25 i SB75+W25 mogłyby w niektórych warunkach spełniać to kryterium, chociaż średnie wartości zawartości popiołu w tych peletach były równe bądź nieznacznie wyższe niż 0,7% s.m. Natomiast w przypadku odniesienia zawartości popiołu do mniej restrykcyjnej pod tym względem normy PFI, do klasy Premium (≤1,0%) zaliczone zostałoby 11 rodzajów peletu spośród 23 wyprodukowanych (rys. 6c).

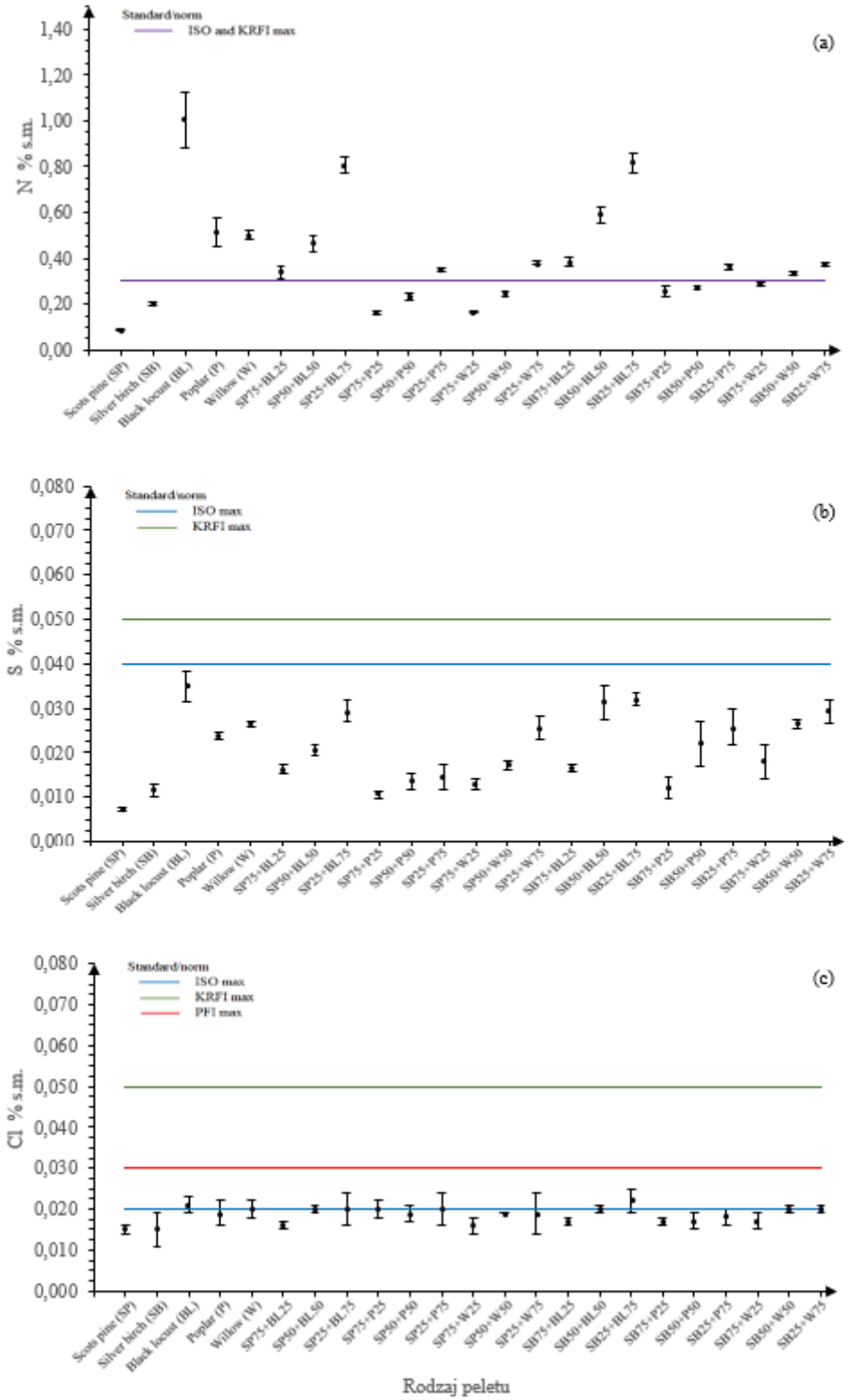
W innych badaniach pelet z biomasy jednoczonych pędów wierzby i topoli charakteryzował się nieco wyższą zawartością popiołu, odpowiednio (1,62 i 1,94% s.m.) (Stolarski i in. 2022b) w porównaniu do badań w ramach rozprawy doktorskiej, co można tłumaczyć młodszym wiekiem pędów SRWC, a w związku z tym większą zawartością kory, a tym samym popiołu. Z kolei pelet z biomasy wierzby SRWC pozyskanej w pięcioletniej rotacji zbioru zawierał 1,6% s.m. popiołu (Gehrig i in. 2019), a więc była to bardzo zbliżona wartość w porównaniu do peletu z tego samego gatunku w badaniach własnych. Niższe wartości tej cechy określono również dla peletu z trzyletnich i sześcioletnich roślin robinii akacjowej, odpowiednio 1,30 i 1,00% s.m. (Latterini i in. 2022). W innych badaniach (Stolarski i in 2022a) zawartość popiołu w pelecie z biomasy leśnej sosny (0,37% s.m.) była wyższa, a w przypadku brzozy porównywalna do badań własnych. Bardziej zróżnicowaną zawartość popiołu w pelecie z biomasy obu gatunków, odpowiednio 0,27 i 0,77% s.m., stwierdzono w innych badaniach Dubodelova i in. (2015).

Skład elementarny

Pelety z biomasy leśnej sosny i brzozy charakteryzowały się istotnie wyższą zawartością węgla oraz istotnie niższą zawartością azotu i siarki w porównaniu do peletów z biomasy SRWC, robinii akacjowej, topoli i wierzby (**P3**). Analizując zróżnicowanie poszczególnych pierwiastków w badanych biopaliwach stałych stwierdzono, że pelet sosnowy zawierał najwięcej węgla (58,40% s.m.). Równie wysoką zawartość tego pierwiastka stwierdzono w

pelecie brzozowym. Natomiast zawartość węgla w peletach z biomasy SRWC była niższa w porównaniu do sosny w zakresie 6,6–8,9%, odpowiednio dla topoli i robinii akacjowej. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało spadek zawartości węgla w peletach powstałych z tych mieszanin. W przypadku zawartości wodoru stwierdzono, że 22 rodzaje peletu charakteryzowały się stężeniem tego pierwiastka powyżej 6% s.m., a tylko pelet SP25+P75 charakteryzował się niższą wartością tej cechy, 5,94% s.m. (**P3**). Najwyższą zawartością wodoru (6,7% s.m.) charakteryzował się pelet brzozowy.

Najniższą zawartością azotu charakteryzował się pelet sosnowy 0,09% s.m. (rys. 7a). W drugim pelecie z biomasy leśnej zawartość tego pierwiastka była o 122% wyższa. Z kolei w pelecie z biomasy SRWC wierzby i topoli wartość ta była jeszcze wyższa, o odpowiednio 456% i 467% w porównaniu do peletu sosnowego. Natomiast w trzecim pelecie z biomasy SRWC, czyli w robinii akacjowej, zawartość azotu była istotnie najwyższa (1,00% s.m.), a więc była ona wyższa aż o 1011% w porównaniu do peletu sosnowego. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało wzrost zawartości azotu w peletach powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin sosny i robinii akacjowej był to wzrost w zakresie aż od 278 do 789%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie od 88 do 289%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 78 do 322%. Z kolei dodawanie do biomasy brzozy biomasy robinii akacjowej powodowało wzrost zawartości azotu w wyprodukowanym pelecie w zakresie od 90 do 305%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie od 30 do 80%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 45 do 85%. W związku z powyższym w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium (≤0,3% s.m.) dla klasy peletów A1 wg normy ISO i klasy Grade 1 wg normy KFRI warunek ten w pełni spełniło dziewięć rodzajów peletu tj. sosnowy, brzozowy, SP75+W25, SP50+W50, SP75+P25, SP50+P50, SB75+P25, SB50+P50 i SB75+W25, ponieważ średnia zawartość azotu jak i wartości odchylenia standardowego nie przekraczały zawartości 0,3% s.m. (rys. 7a). Zawartość azotu w pelecie była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością popiołu, siarki, chloru i udziałem frakcji drobnej oraz istotnie ujemnie skorelowana z zawartością węgla, części lotnych, ciepłem spalania, wartością opałową i wytrzymałością mechaniczną (**P3**). Również w innych badaniach pelet z trocin pochodzenia leśnego charakteryzował się najniższą zawartością N w porównaniu do peletów z SRWC i innych rodzajów biomasy pochodzenia rolniczego (**P3**).



Rysunek 7. Zawartość azotu (a), siarki (b) i chloru (c) w badanych peletach w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnych trzech klas peletów A1, Premium i Grade 1 z norm jakościowych, odpowiednio: ISO, PFI i KFRI (źródło: opracowanie własne)

Pelet sosnowy charakteryzował się również najniższą zawartością siarki 0,007% s.m. (rys. 7b). Zależności w odniesieniu do zawartości siarki w badanych peletach były analogiczne jak w przypadku zawartości azotu, chociaż różnice procentowe pomiędzy peletami były w większości przypadków mniejsze. W drugim pelecie z biomasy leśnej zawartość siarki była o 71% wyższa. Z kolei w pelecie z biomasy SRWC topoli, wierzby i robinii akacjowej wartość ta była jeszcze wyższa, o odpowiednio 243%, 271% i 400% w porównaniu do peletu sosnowego. Dlatego też ponownie zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało wzrost zawartości siarki w peletach powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin sosny i robinii akacjowej był to wzrost w zakresie aż od 129 do 314%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie od 57 do 114%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 86 do 271%. Z kolei dodawanie do biomasy brzozy biomasy robinii akacjowej powodowało wzrost zawartości siarki w wyprodukowanym pelecie w zakresie od 33 do 167%, w mieszaninach z topolą był to wzrost w zakresie do 117%, w mieszaninach z wierzbą był to wzrost w zakresie od 50 do 142%. W związku z powyższym w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium dla klasy peletów A1 wg normy ISO (≤0,04% s.m.) i Grade 1 wg normy KFRI (≤0,05% s.m.) warunek ten w pełni spełniły wszystkie rodzaje wyprodukowanych peletów (rys. 7b).

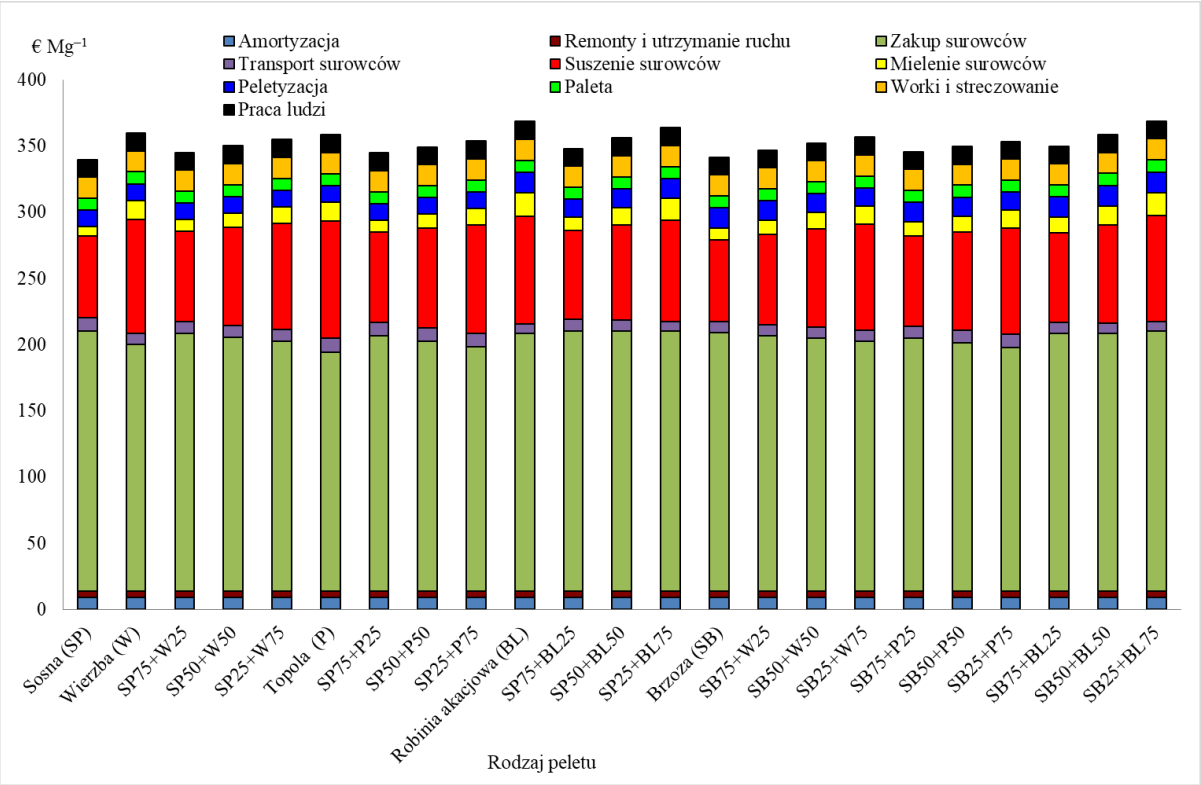
W innych badaniach pelet z trocin sosny i brzozy charakteryzował się zbliżonymi zawartościami siarki (Stolarski i in. 2022a) w porównaniu do tych uzyskanych w badaniach własnych. Z kolei pelety z biomasy jednoczonych pędów wierzby (0,043% s.m.) i topoli (0,049% s.m.) zawierały około dwukrotnie więcej S (Stolarski i in. 2022b) w porównaniu do wartości uzyskanych w badaniach własnych dla peletu z tych samych gatunków. Jeszcze wyższą zawartość S (0,067% s.m.) stwierdzono w innym pelecie z biomasy wierzby (Gehrig i in. 2019). Tak więc generalnie pelet z SRWC zawierał więcej S w porównaniu do peletów z drewna pochodzenia leśnego. Jeszcze wyższą zawartością S charakteryzowały się pelety ze słomy zbożowej oraz miskanta (**P3**).

Zawartość chloru w peletach z biomasy leśnej (0,015% s.m.) była niższa w zakresie 27–40% w porównaniu do wartości stwierdzonych w peletach z biomasy SRWC, odpowiednio dla topoli i robinii akacjowej (rys. 7c). W peletach z mieszaniny biomasy sosny i SRWC zawartość chloru była wyższa w zakresie 7–33% w porównaniu do zawartości w czystym pelecie sosnowym. Z kolei w peletach z mieszaniny biomasy brzozy i SRWC różnice te dochodziły do 47%. Pomimo tego zróżnicowania uwzględniając średnią zawartość Cl, stwierdzono, że 21 rodzajów peletów spełniło wymagania w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego kryterium

dla klasy peletów A1 wg normy ISO (≤0,02% s.m.) (rys. 7c). Chociaż osiem rodzajów peletu było na pograniczu tej maksymalnej wartości, a uwzględniając wartość odchylenia standardowego należy stwierdzić, że czasami wartość ta mogłaby być teoretycznie wyższa. Natomiast kryterium tego nie spełniły pelety z biomasy robinii akacjowej i SB25+BL75. Natomiast wszystkie pelety spełniały wymagania w zakresie zawartości chloru w odniesieniu najbardziej restrykcyjnego kryterium dla klasy peletów Premium wg normy PFI (≤0,03% s.m.) i dla klasy peletów Grade 1 wg normy KFRI (≤0,05% s.m.).

4.6. Koszty produkcji peletu (P4)

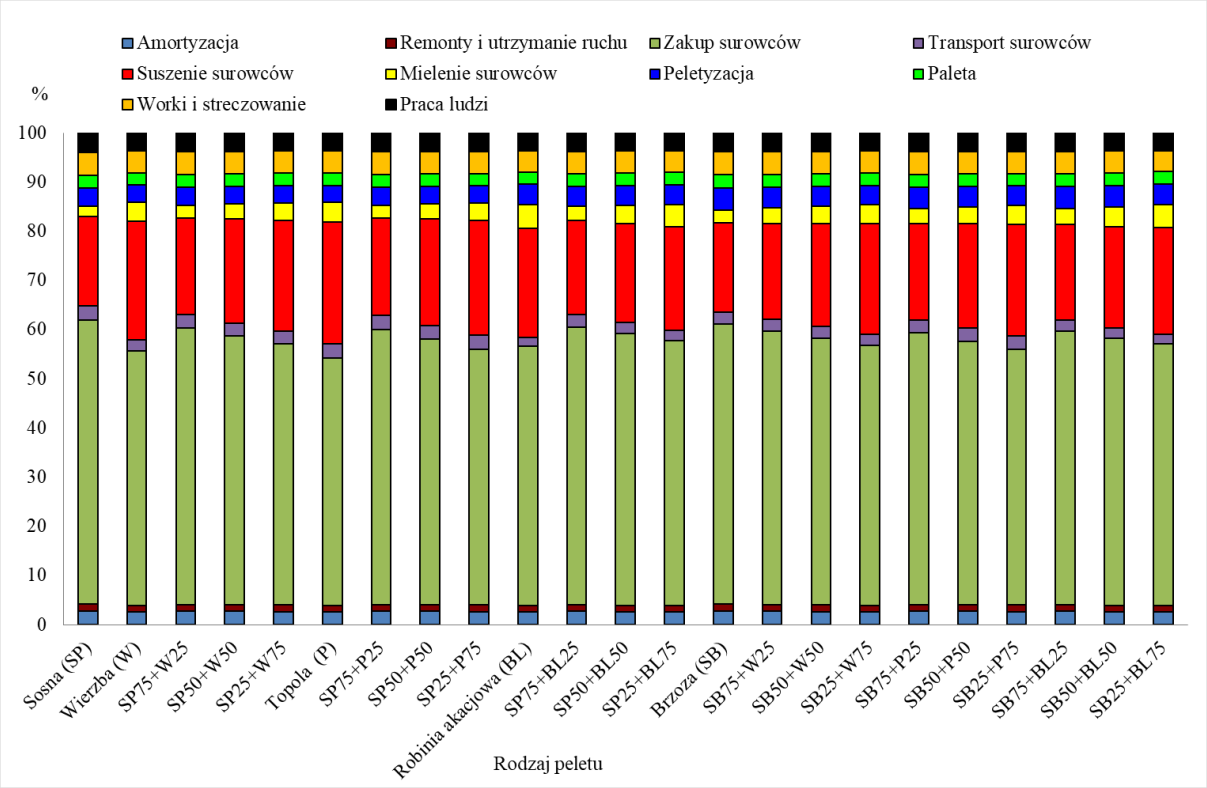
Najniższe koszty produkcji peletu (339,72 € Mg^{-1}) stwierdzono w przypadku użycia do tego celu trocin sosnowych (rys. 8). Koszty produkcji peletu z trocin drugiego gatunku pochodzenia leśnego (brzozy) były nieznacznie wyższe, o średnio 0,6%. Z kolei koszty produkcji peletu ze zrębków SRWC topoli i wierzby były wyższe w zakresie 5-6%, w porównaniu do peletu sosnowego i wynosiły odpowiednio 358,55 i 359,76 € Mg^{-1}. Natomiast koszty produkcji peletu ze zrębków SRWC robinii akacjowej były wyższe o 8,5% w porównaniu do peletu sosnowego i wynosiły 368,47 € Mg^{-1}. Wyższe koszty produkcji peletu z biomasy SRWC w porównaniu do trocin drewna leśnego wynikały głównie z wyższych kosztów związanych z suszeniem oraz mieleniem zrębków w porównaniu do trocin. Ponadto w przypadku produkcji peletu z robinii akacjowej oraz brzozy wyższe były również koszty samego procesu peletyzacji, co wynikało z większej twardości tych dwóch surowców. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy gatunków SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało generalnie wzrost kosztów produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin biomasy sosny z SRWC wzrost ten zawierał się w zakresie od 1,5 do 7,1%. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC wzrost tego wskaźnika zawierał się w zakresie od 1,8 do 8,5%.



Rysunek 8. Koszty produkcji peletu (€ Mg^{-1}) z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

W strukturze kosztów produkcji peletów zdecydowanie największy udział stanowiły koszty związane z zakupem surowców (rys. 9). Zawierały się one w przedziale od 50,26% do 57,82% całkowitych kosztów produkcji, odpowiednio dla peletu z topoli i sosny. Wynikało to z wilgotności i wartości opałowej poszczególnych surowców oraz ceny ich zakupu. Na drugim miejscu w strukturze kosztów produkcji peletu znajdowały się koszty związane z suszeniem surowców, które zawierały się w przedziale od 18,07% do 24,80% całkowitych kosztów produkcji, odpowiednio dla brzozy i topoli. Wyższe koszty suszenia dla biomasy SRWC wynikały z dłuższego czasu suszenia zrębków w porównaniu do trocin, co zwiększało koszty całkowite tego procesu. Koszty związane z mieleniem i peletyzacją surowców stanowiły łącznie od 5,75% do 9,04%, odpowiednio dla sosny i robinii akacjowej. Wyższe koszty tych procesów dla biomasy SRWC wynikały z dwuetapowego mielenia zrębków w porównaniu do trocin. Ponadto w przypadku brzozy i robinii akacjowej były one wyższe ze względu na twardość tych surowców. Znaczący udział w strukturze kosztów produkcji peletu zajmowały koszty związane z jego pakowaniem i składowaniem, w których folia i paleta stanowiły odpowiednio 4,32–4,69% i 2,44–2,65% i były one mniej zróżnicowane pomiędzy rodzajami

peletów. Również koszty związane z pracą ludzi (3,61–3,92%), amortyzacją linii (2,55–2,77%), transportem surowców (1,92–2,90%), remontami i konserwacją (1,28–1,38%) były nieznacznie zróżnicowane pomiędzy rodzajami peletów.



Rysunek 9. Struktura kosztów produkcji peletu (%) z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

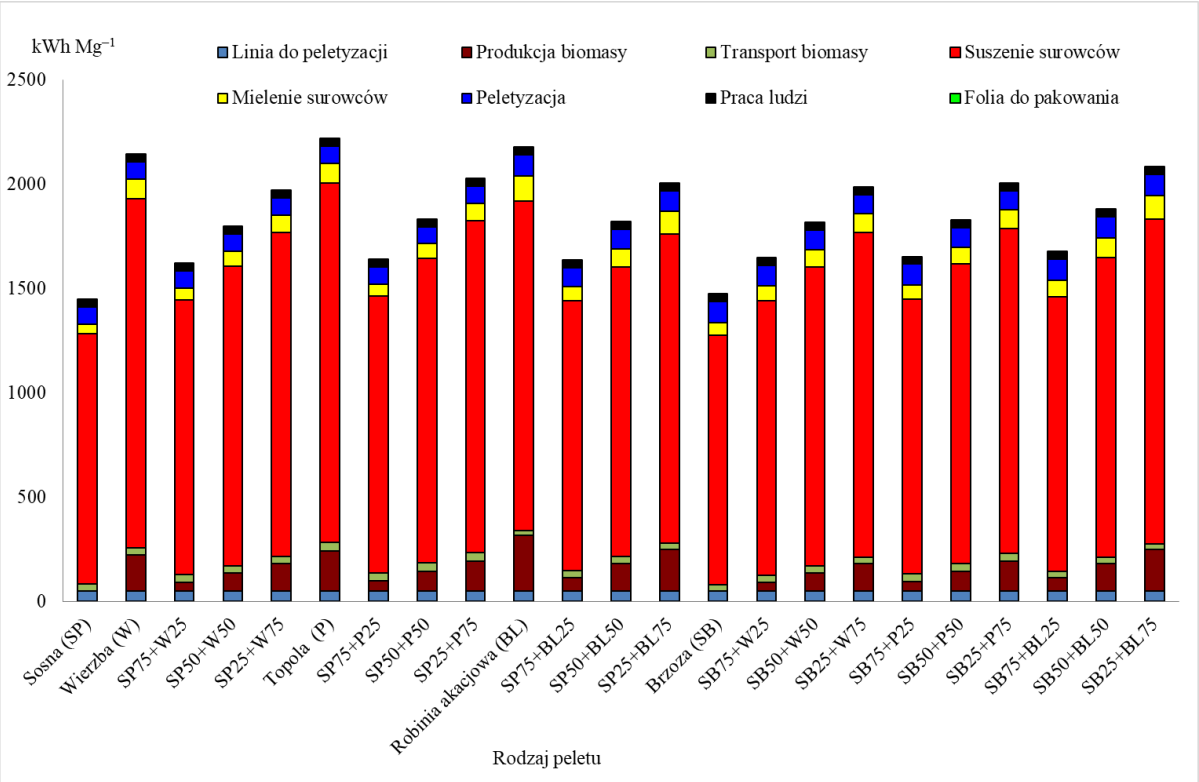
Ocena i dyskusja kosztów produkcji peletu jest trudnym wyzwaniem, ponieważ dane literaturowe pochodzą z różnych krajów, warunków środowiskowych i gospodarczych (Nabavi i in. 2020; Visser i in. 2020). Dlatego też związane z tym koszty jak: budynki, maszyny i urządzenia, amortyzacja, surowce, energia, wynagrodzenia personelu i uwarunkowania lokalnego rynku zawsze znacznie się różniły. Dodatkowo skomplikowanie sytuacji polityczno-gospodarczej z początkiem 2022 r. wpłynęło na bardzo duże wzrosty cen surowców energetycznych, a tym samym kosztów energii. W związku z tym generalnie znacząco wzrosły koszty funkcjonowania społeczeństw, co z kolei wpłynęło na duży wzrost inflacji. Dlatego też koszty produkcji peletu uzyskane w badaniach własnych, odnoszących się do cen za 2022 r. były zdecydowanie wyższe w porównaniu do innych wyników badań. Z danych literaturowych wynika, że wcześniej koszty produkcji peletu drzewnego były niższe i zawierały się w

przedziałach 130–226 € Mg^{-1} (Jacobson i Ciolkosz 2020), 136–143 € Mg^{-1} (Visser i in. 2020), 104–108 € Mg^{-1} (Nabavi i in. 2020), w więc rzadko przekraczały 200 € Mg^{-1} i oscylowały najczęściej w zakresie około 100–150 € Mg^{-1}. Również w innych badaniach koszt produkcji peletu z trocin sosnowych był zbliżony i wynosił 144 € Mg^{-1} (García i in. 2021). Należy również podkreślić, że pomimo różnic w wartościach całkowitych kosztów produkcji peletu pomiędzy różnymi krajami, latami i wskazanymi powyżej uwarunkowaniami gospodarczymi, zakup surowca zawsze stanowił bardzo znaczący udział (30–40%) w strukturze kosztów produkcji peletu. W badaniach własnych dla 2022 r. udział zakupu surowców był jeszcze wyższy (50–58%), co wynikało bezpośrednio z wysokich cen surowców energetycznych. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że gdyby badania własne były realizowane w 2021 r., kiedy to koszt zakupu surowców był zdecydowanie niższy i kształtował się na poziomie ok. 5 € GJ^{-1}, niższe były też koszty energii elektrycznej i paliw transportowych, a inflacja wynosiła 5,1%, to wtedy całkowite koszty produkcji peletu byłyby niższe aż o około 46% i zawierały by się w zakresie od 183 do 198 € Mg^{-1}. Natomiast koszty zakupu surowców w strukturze produkcji stanowiłyby od 41 do 47% kosztów całkowitych. Tak więc potencjalne wyniki własne kosztów całkowitych oraz udziału kosztów zakupu surowców w strukturze produkcji peletu za 2021 r. byłyby bardziej zbliżone do wartości literaturowych. Ponadto należy podkreślić, że te potencjalne koszty produkcji peletu za 2021 r. oraz te uzyskane w badaniach własnych za 2022 r. były spójne z europejskimi cenami rynkowymi peletu drzewnego z tego okresu (Bioenergy Europe 2022). W okresie pomiędzy styczniem 2021 r., a lipcem 2022 r. ceny peletu w Europie znacząco wzrastały. W Polsce od stycznia do sierpnia 2021 r. cena kształtowała się na poziomie 210 € Mg^{-1}, po czym zaczęła wzrastać i w grudniu 2021 r. osiągnęła poziom 280 € Mg^{-1}. Z początkiem 2022 r. cena ta wynosiła już ponad 300 € Mg^{-1} (Bioenergy Europe 2022), a po wybuchu wojny w Ukrainie zaczęła dynamicznie wzrastać osiągając na jesieni 2022 r. poziom nawet ok. 600 € Mg^{-1} (dane z lokalnego rynku peletu północno-wschodniej Polski). Również w innych krajach Europy w tym okresie ceny peletu dynamicznie wzrastały. Należy tu jednak dodać, że po tych bardzo dynamicznych, wręcz niepokojących wzrostach ceny peletu zaczęły spadać i w okresie pisania tej pracy (styczeń 2023 r.) ceny detaliczne peletu w Polsce oscylowały w zakresie 330–430 € Mg^{-1} (dane z lokalnego rynku peletu północno-wschodniej Polski). Należy zakładać, że ta sytuacja przyczyni się również do spadku cen surowców do produkcji peletu, a co za tym idzie wpłynie też na obniżenie kosztów jego produkcji. Jednakże z drugiej strony należy podkreślić, że informacje docierające z rynku peletu wskazują, że nie należy spodziewać się dalszych znaczących obniżek cen peletu. W związku z tym należy ciągle poszukiwać dodatkowych źródeł surowców do produkcji tego odnawialnego biopaliwa stałego

w celu zwiększenia bezpieczeństwa jego produkcji i dostaw dla odbiorców końcowych, jak również w celu stabilizacji kosztów produkcji i cen sprzedaży.

4.7. Energochłonność i wybrane wskaźniki efektywności produkcji peletu (P4)

Podobnie jak w przypadku kosztów, najniższe nakłady energetyczne produkcji peletu (1448 kWh Mg^{-1}) stwierdzono w przypadku użycia do tego celu trocin sosnowych (rys. 10). Nakłady energetyczne peletu z trocin brzozowych były wyższe o średnio 1,9%, co wynikało z wyższych nakładów na mielenie i peletyzację trocin brzozy w porównaniu do sosny. Natomiast zdecydowanie wyższe były nakłady energetyczne produkcji peletu ze zrębków SRWC. W przypadku wierzby, robinii akacjowej i topoli wynosiły one odpowiednio: 2144,5; 2177,2 i 2218,6 kWh Mg^{-1}, a więc były one wyższe o 48,1; 50,4 i 53,2% w porównaniu do sosny. Wyższe nakłady energetyczne produkcji peletu z biomasy SRWC w porównaniu do trocin drewna leśnego wynikały głównie z wyższych nakładów związanych z suszeniem oraz mieleniem zrębków w porównaniu do trocin. Ponadto w przypadku SRWC uwzględniono również nakłady energetyczne na produkcję i pozyskanie zrębków, a w przypadku trocin nie uwzględniono tego etapu zakładając, że są one pozostałością poprodukcyjną, a więc nie poniesiono na ich powstanie dodatkowych nakładów energetycznych. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało znaczący wzrost nakładów energetycznych produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin biomasy sosny z SRWC wzrost ten zawierał się w zakresie od 12,0 do 39,9%. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC wzrost tego wskaźnika zawierał się w zakresie od 13,7 do 43,9%. W całym eksperymencie najwyższe nakłady energetyczne były związane z produkcją peletu z topoli, głównie ze względu na najwyższą wilgotność tego surowca co z kolei wiązało się z najwyższym nakładem energetycznym na jego suszenie (1723 kWh Mg^{-1}).

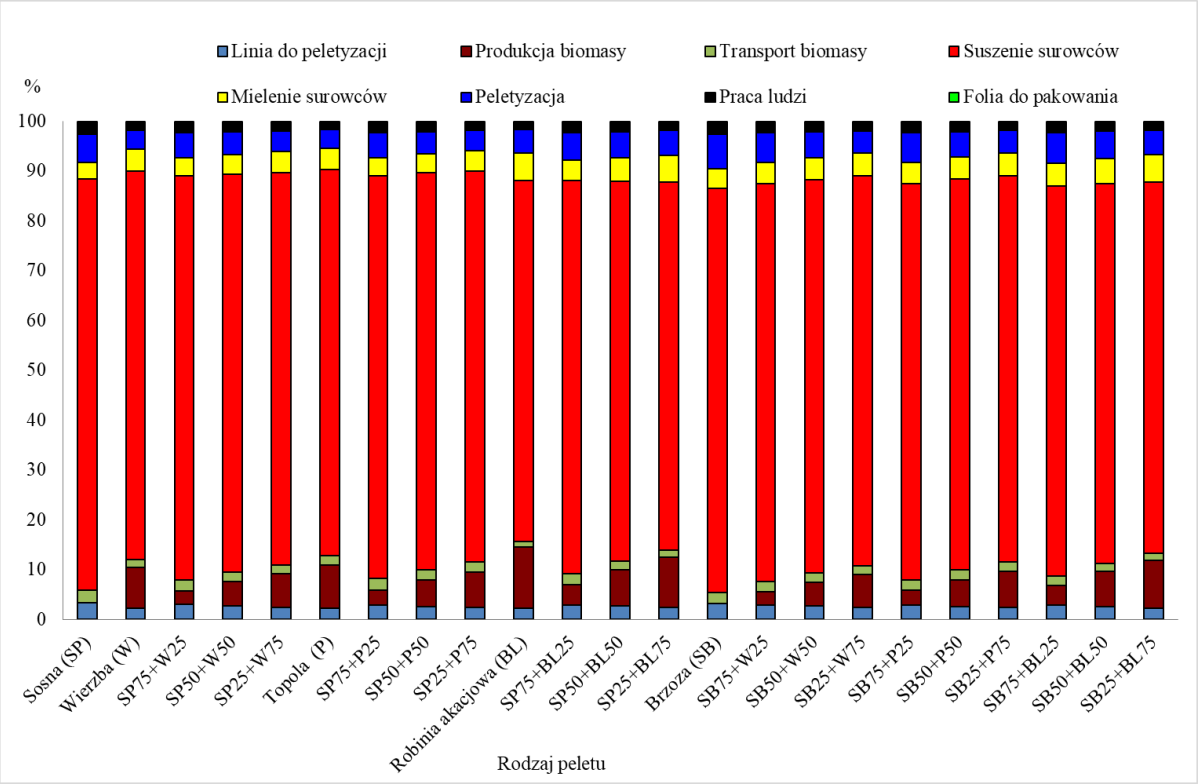


Rysunek 10. Nakłady energetyczne produkcji peletu (kWh Mg^{-1}) z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

Porównując natomiast rodzaje peletowanej biomasy stwierdzono, że trociny brzozowe (drewno liściaste) charakteryzowała większa energochłonność peletyzacji w porównaniu do trocin sosnowych (drewno iglaste). W innych badaniach także stwierdzono, że pelety z drewna liściastego były trudniejsze do wyciśnięcia z matrycy niż pelety z drewna iglastego, a ponadto pelety z drewna liściastego łatwiej zakleszczały się w matrycy. Również peletowanie buku wymagało więcej energii niż peletowanie sosny (Masche i in. 2019). Z powyższych danych wynika, że energochłonność peletowania surowców pochodzących z drewna liściastego jest wyższa niż z drewna iglastego, dlatego proces produkcji peletu z drewna liściastego wymaga większej uwagi (Frodeson i in. 2018), co zostało potwierdzone również w badaniach własnych. Dlatego stosowanie różnych mieszanin surowców może wpływać na wzrost lub obniżenie nakładów energetycznych peletyzacji. Przykładowo energochłonność peletowania drewna liściastego można zmniejszyć poprzez mieszanie z drewnem iglastym i materiałami adhezyjnymi.

W strukturze nakładów energetycznych produkcji peletów w badaniach własnych zdecydowanie największy udział stanowiły nakłady związane z suszeniem surowców (rys. 11).

Zawierały się one w przedziale od 74,64 do 82,63% nakładów całkowitych, odpowiednio dla peletu SB25+BL75 i sosnowego. Na drugim miejscu w strukturze nakładów energetycznych produkcji peletu znajdowały się nakłady związane z produkcją biomasy SRWC i zawierały się on w przedziale od 8,20 do 12,27%, odpowiednio dla wierzby i robinii akacjowej. Nakłady energetyczne związane z mieleniem surowców wynosiły od 3,24 do 5,45%, odpowiednio dla sosny i SB25+BL75. Natomiast nakłady związane z peletyzacją wynosiły od 3,71 do 6,97%, odpowiednio dla peletu topoli i brzozy. Nakłady energetyczne związane z amortyzacją linii (2,29–3,30%), pracą ludzi (1,60–2,30%), transportem surowców (1,31–2,56%), zużyciem folii (0,19–0,29%) były niższe i nieznacznie zróżnicowane pomiędzy rodzajami peletów.



Rysunek 11. Struktura nakładów energetycznych produkcji peletu (%) z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

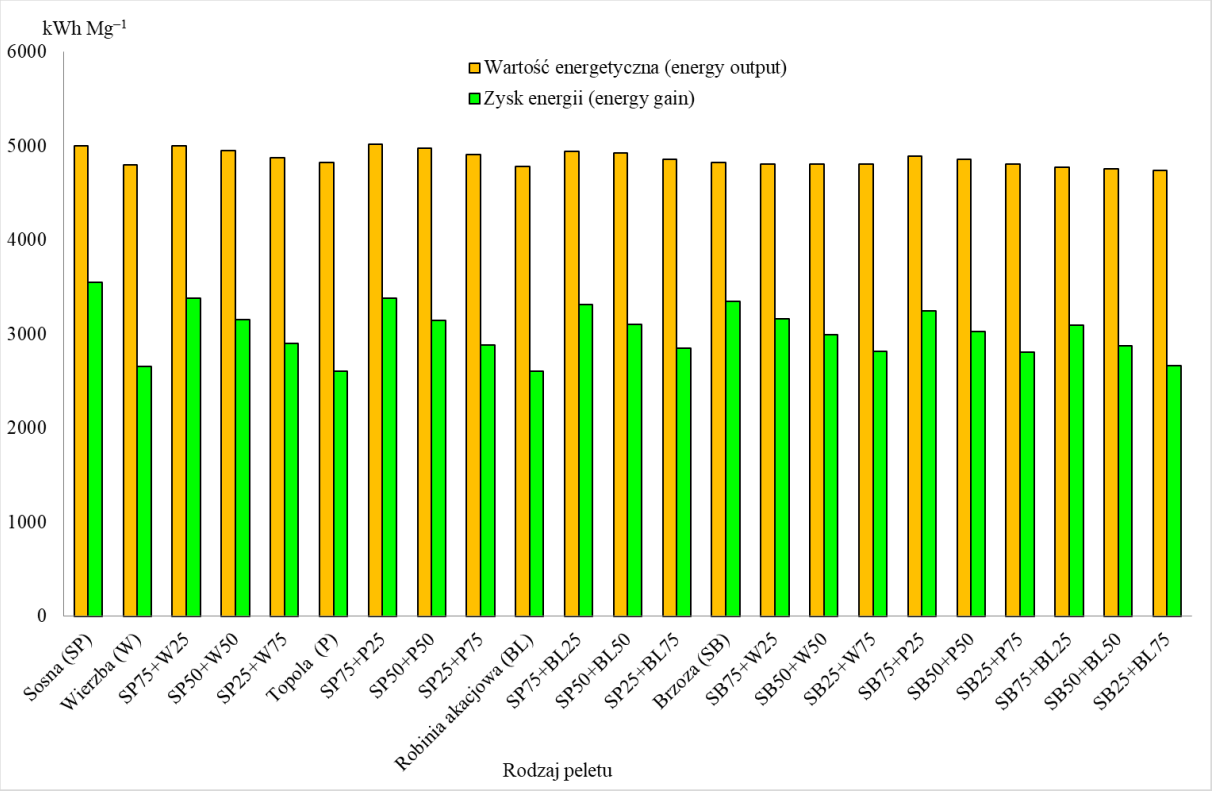
Trzeba podkreślić, że energochłonność całego procesu peletowania może być bardzo różna ze względu na różne rodzaje surowców, technologie ich pozyskania, wilgotność początkową, zastosowane urządzenia i inne rozwiązania techniczno-organizacyjne. W konwencjonalnym procesie peletowania biomasy drzewnej o wilgotności ok. 30% energochłonność całego procesu została oszacowana na około 557 kWh Mg^{-1}. Największe

nakłady (61–65%) były związane z suszeniem surowca, a proces peletowania stanowił 8–9% nakładów całkowitych (Tumuluru 2016; 2019). Zbliżone nakłady energetyczne produkcji peletu z trocin (568 kWh Mg^{-1}) uzyskano również w innych analizach, z czego nakłady związane z suszeniem i peletyzacją wynosiły odpowiednio 70 i 9% (Mobini i in. 2013). Trzeba tu dodać, że pomimo iż cytowane energochłonności produkcji peletu były niższe w porównaniu do naszych wyników uzyskanych nawet dla sosny, ze względu na różnie zaplanowany proces i warunki produkcji peletu, to struktura tych nakładów była już bardziej podobna. Z kolei z danych European Pellet Council (Bioenergy Europe 2023) wynika, że energochłonność produkcji peletu z biomasy drzewnej (bez uwzględnienia transportu gotowego peletu) wynosiła około 858 kWh Mg^{-1}, z czego 71,6% pochłaniało suszenie surowca, a pozostałe elementy procesu peletyzacji stanowiły 28,4%. Tak więc cytowane wyniki były jeszcze bardziej zbliżone do wartości uzyskanych w badaniach własnych, w których suszenie stanowiło średnio 78% całkowitych nakładów energetycznych.

Pelety sosnowy oraz z mieszanin sosny z najniższym udziałem wierzby i topoli (SP75+W25, SP75+P25) charakteryzowały się wartością energetyczną (energy output) równą lub wyższą niż 5000 kWh Mg^{-1} (rys. 12). Spośród badanych peletów najniższą wartością energetyczną (4744,4 kWh Mg^{-1}) charakteryzował się pelet SB25+BL75. Zwiększanie udziału SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny generalnie powodowało spadek wartości energetycznej peletów powstałych z tych mieszanin (oprócz SP75+P25) do maksymalne 2,8%. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC obniżenie wartości energetycznej wynosiło maksymalnie 1,6%, a w peletach SB75+P25 i SB50+P50 był to wzrost o odpowiednio 1,6% i 0,7% w porównaniu do czystego peletu z brzozy.

Po uwzględnieniu wartości energetycznej peletów (energy output) i całkowitych nakładów energii (total energy input) poniesionych na ich produkcję stwierdzono, że najwyższy zysk energii (energy gain) (3552,0 kWh Mg^{-1}) uzyskano dla peletu sosnowego (rys. 12). Zysk energii peletu z trocin brzozowych był niższy o 5,8% w porównaniu do sosny. Natomiast zysk energii z produkcji peletu wierzby, topoli i robinii akacjowej wynosił odpowiednio: 2658,3; 2608,9 i 2603,6 kWh Mg^{-1}, a więc były to niższe wartości o 25,2; 26,6 i 26,7% w porównaniu do sosny. Wynikało to oczywiście bezpośrednio z wyższej energochłonności produkcji i procesu przygotowania zrębków SRWC do procesu peletyzacji. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało spadek zysku energii peletów powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin biomasy sosny z SRWC spadek ten zawierał się w zakresie od 4,9 do 19,7%, odpowiednio dla peletów SP75+W25 i SP25+BL75. Natomiast w przypadku mieszanin

brzozy z SRWC spadek tego wskaźnika zawierał się w zakresie od 8,7 do 25,1%, odpowiednio dla peletów SB75+P25 i SB25+BL75, w porównaniu do najwyższej wartości uzyskanej dla sosny.

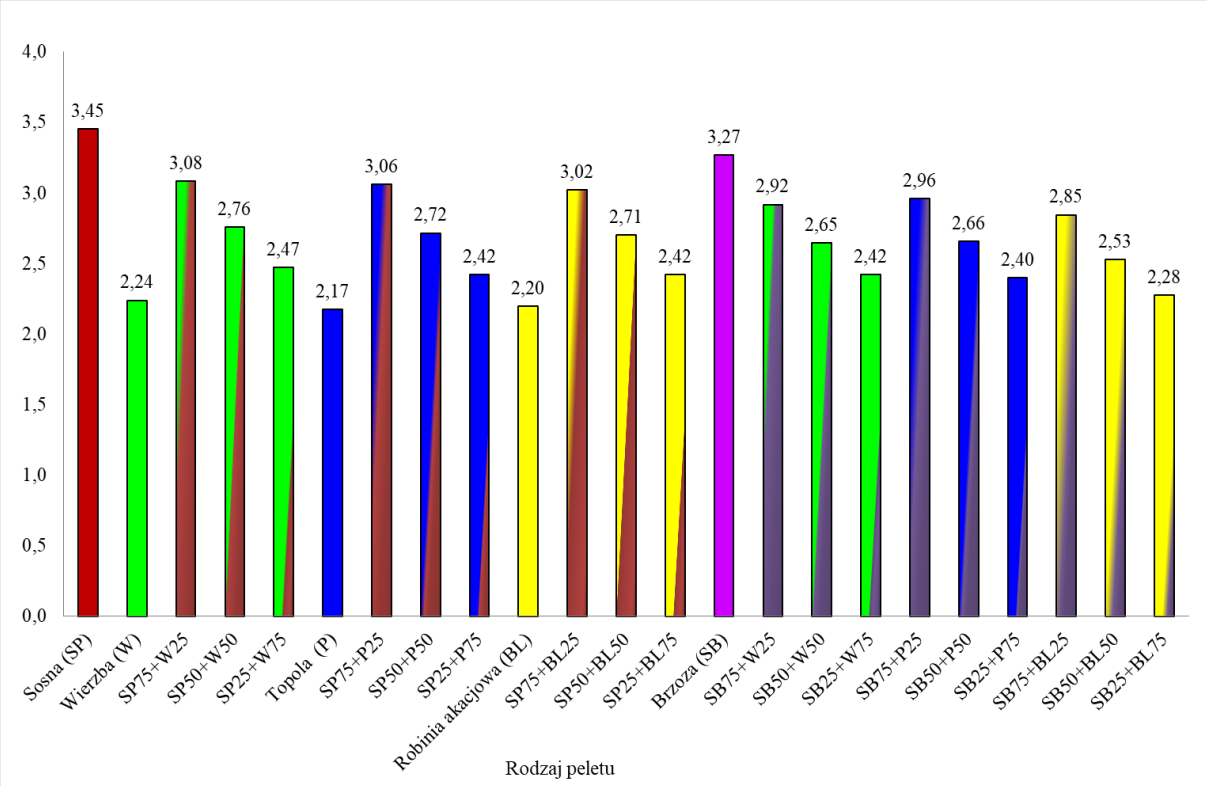


Rysunek 12. Wartość energetyczna (energy output) i zysk energii (energy gain) peletów (kWh Mg^{-1}) z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

Wskaźnik efektywności energetycznej (energy ratio) produkcji peletów określony jako iloraz ich wartości energetycznej do całkowitych nakładów energii był najwyższy (3,45) dla sosny (rys. 13). Natomiast wartość tego wskaźnika dla drugiego peletu z biomasy leśnej (brzozy) była niższa o 5,3%. Z kolei energy ratio produkcji peletu z biomasy SRWC wierzby, robinii akacjowej i topoli było niższe o 35,1; 36,3 i 37,1% w porównaniu do sosny i zawierało się w zakresie 2,17–2,24. Obniżenie wartości tego wskaźnika wynikało z wyższej energochłonności produkcji i procesu przygotowania zrębków SRWC do procesu peletyzacji w porównaniu do trocin. W związku z powyższym zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało spadek energy ratio produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. W przypadku mieszanin biomasy sosny z SRWC spadek ten zawierał się w zakresie od 10,7 do 29,9%, odpowiednio dla peletów

SP75+W25 i SP25+BL75. Natomiast w przypadku mieszanin brzozy z SRWC spadek tego wskaźnika zawierał się w zakresie od 14,2 do 34,1%, odpowiednio dla peletów SB75+P25 i SB25+BL75, w porównaniu do najwyższej wartości uzyskanej dla sosny.

Z danych European Pellet Council (Bioenergy Europe 2023) wynika, że wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z biomasy drzewnej wynosił 5,4, a więc był wyższy w porównaniu do wartości uzyskanych dla wszystkich rodzajów peletu w badaniach własnych. Jeszcze wyższe energy ratio (5.75) uzyskano dla peletu z sorga (Wiloso i in. 2020). Z kolei energy ratio peletu z mieszaniny trocin sosny i słomy ryżowej w zależności od badanych wariantów produkcji zawierało się w zakresie 2.5–3.4 (Dao i in. 2022), a więc były to wartości zbliżone do tych uzyskanych w badaniach własnych.



Rysunek 13. Wskaźnik efektywności energetycznej (energy ratio) produkcji peletów z wybranych gatunków biomasy leśnej (sosna, brzoza) i SRWC (wierzba, topola, robinia akacjowa) oraz z ich mieszanin (źródło: opracowanie własne)

Trzeba tu dodać, że gdyby surowce wykorzystywane do peletyzacji były suszone w warunkach naturalnych lub ciepłem odpadowym i gdyby były one suche to nie byłoby konieczności uwzględniania nakładów energetycznych ponoszonych na termiczne ich suszenie, co wpłynęłoby na bardzo duży wzrost wskaźnika efektywności energetycznej produkcji. Z

przeprowadzonej analizy wynika, że w tym wariancie, w którym pominięto nakłady związane z suszeniem surowców, wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z suchych trocin sosny i brzozy wynosiłby odpowiednio 23,4 i 20,0. Również wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z biomasy SRWC wierzby, topoli i robinii akacjowej byłby wyższy i wynosiłby odpowiednio 18,8; 18,3 i 16,3. Oczywiście w dalszym ciągu zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do biomasy leśnej sosny i brzozy powodowało spadek wskaźnika efektywności energetycznej produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. Przy czym wyższe wartości tego wskaźnika uzyskiwano dla mieszanin z sosną niż dla mieszanek z brzozą.

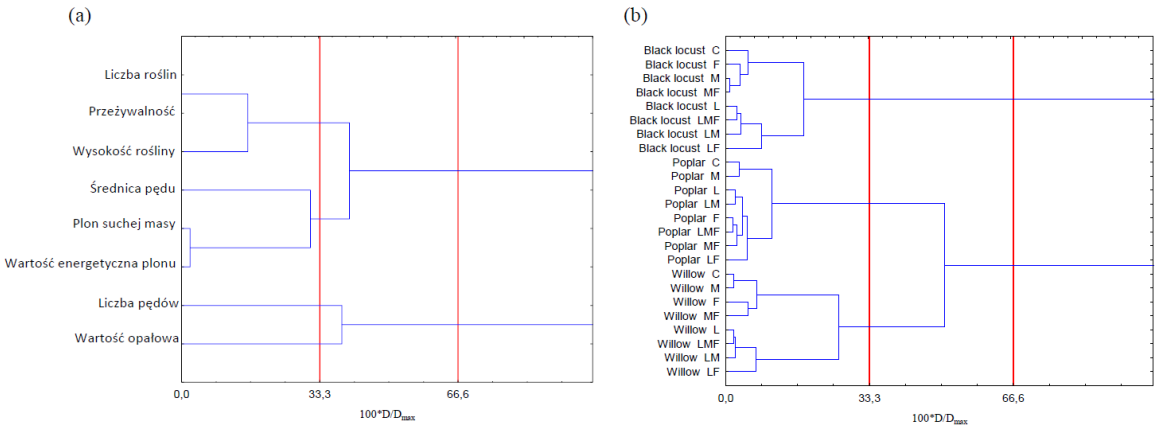
4.8. Praktyczne znaczenie uzyskanych wyników

*Na podstawie badań zaprezentowanych w **P1***

Stwierdzono, że SRWC to ważna grupa roślin, która jest istotnym źródłem biomasy drzewnej na cele energetyczne. 12-letnie wyniki badań wykazały, że SRWC mogą być uprawiane na słabej glebie ale jednocześnie należy spodziewać się również znacznej zmienności w produkcji biomasy i ilości zgormadzonej w niej energii. W badaniach prowadzonych w trzech powtórzeniach, dla trzech gatunków SRWC i ośmiu sposobów wzbogacenia gleby przez trzy kolejne czteroletnie rotacje zbioru (łącznie 216 obiektów) średni plon suchej masy wyniósł 7,46 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m. Przy czym wartość górnego kwartyla wynosiła 9,69 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m., wartość maksymalna 18,09 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m., a w spółczynnik zmienności 45,1%. Również wartość energetyczna plonu SRWC charakteryzowała się wysoką zmiennością na poziomie 44,4%. Średnia wartość tej cechy wynosiła niespełna 120 GJ ha^{-1} rok^{-1}, ale wartość maksymalna wynosiła 296,40 GJ ha^{-1} rok^{-1}, co świadczy o dużym potencjale energetycznym SRWC.

Analiza skupień wykazała, że pod względem analizowanych cech przy odcięciu 2/3 D_{max} wyodrębnione zostały dwa klastry (rys. 14a). W jednym klastrze znalazły się liczba pędów i wartość opałowa, a w drugim klastrze znalazły się pozostałe badane parametry jak liczba roślin, przeżywalność, wysokość i średnica pędu, plon suchej masy i wartość energetyczna plonu. Z kolei przy odcięciu 1/3 D_{max} wyodrębnione zostały cztery klastry. W przypadku analizy gatunków SRWC i sposobów wzbogacenia gleby stwierdzono, że przy odcięciu 2/3 D_{max} powstały dwa klastry (rys. 14b). Robinia akacjowa niezależnie od sposobu wzbogacenia gleby utworzyła własny klaster. Natomiast topola i wierzba utworzyły drugi wspólny klaster. Z kolei przy odcięciu 1/3 D_{max} wyodrębnione zostały trzy klastry. Robinia akacjowa dalej

stanowiła jeden oddzielny klaster. Ponadto powstały dwa oddzielne klastry tylko dla topoli i tylko dla wierzby. Co oznacza, że po uwzględnieniu wszystkich analizowanych cech każdy z badanych gatunków stanowił odrębną grupę, niezależnie od zastosowanego sposobu wzbogacenia gleby. Podczas gdy analizując oddzielnie poszczególne cechy okazywało się, że czasami nie występowały różnice pomiędzy tymi gatunkami.



Rysunek 14. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa badanych cech (a) oraz gatunków SRWC i sposobów wzbogacenia gleby (b). Czerwoną pionową linią zaznaczono kryterium Sneath'a (2/3 D_{max}) i (1/3 D_{max}). D – miara odległości; D_{max} – maksymalna miara odległości D (źródło: opracowanie własne)

Z przedstawionych w **P1** danych wynika, że to gatunek SRWC bardziej determinował poszczególne cechy niż zastosowane sposoby wzbogacenia gleby. Trzeba podkreślić, że robinia akacjowa w pewnym sensie odstawała od topoli i wierzby od samego początku realizacji tego 12 letniego eksperymentu. Już na samym początku wskutek niskich opadów bezpośrednio po wysadzeniu zielnych sadzonek robinii akacjowej, wiele z nich obumarło co skutkowało niską obsadą roślin. Z kolei wierzba prezentowała się dobrze, szczególnie w pierwszej czteroletniej rotacji zbioru, w której charakteryzowała się największą liczbą roślin i plonowała najwyżej spośród badanych SRWC. Natomiast w kolejnych dwóch rotacjach zbioru liczba roślin wierzby zmniejszała się co skutkowało tylko niewielkim wzrostem plonu biomasy w drugiej rotacji zbioru i jego obniżaniem w trzeciej rotacji. Jedną z przyczyn tego zjawiska mogły być niższe opady oraz wyższe średnioroczne temperatury w drugiej i trzeciej rotacji zbioru w porównaniu do pierwszej. Okazało się, że spośród badanych gatunków wierzba najgorzej znosiła te niekorzystne warunki środowiskowe. W odniesieniu do topoli należy stwierdzić, że gatunek ten charakteryzował się największą stabilnością w okresie trzech czteroletnich rotacji zbioru w zakresie liczby roślin, poziomu plonowania i wartości energetycznej plonu. Co więcej pomimo

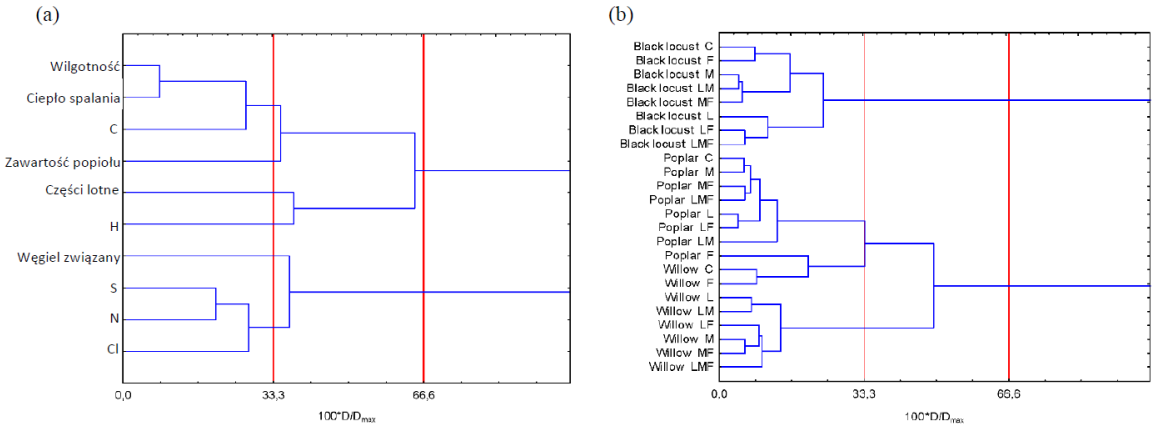
spadku liczby roślin plon biomasy oraz wartość energetyczna topoli wzrastały od pierwszej do trzeciej rotacji zbioru. Ponadto trzeba podkreślić, że spośród badanych gatunków SRWC, to właśnie topola uzyskała najlepsze wyniki w obiektach kontrolnych czyli bez żadnego wzbogacenia gleby. W związku z tym stwierdzono, że reakcja topoli na zastosowane sposoby wzbogacenia gleby była słabsza niż w przypadku wierzby i robinii akacjowej. Z kolei w odniesieniu do zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby najlepsze efekty stwierdzono w obiektach, w których stosowano ligninę. Fakt ten można wiązać z tym, że lignina to materia organiczna, która prawdopodobnie przyczyniła się do poprawy właściwości słabej gleby, w tym być może do lepszego magazynowania wody. Dzięki czemu w wariantach, w których zastosowano ligninę, rośliny miały lepsze warunki do wzrostu i rozwoju, w porównaniu do pozostałych obiektów.

*Na podstawie badań zaprezentowanych w **P2***

Dendrogram hierarchicznej analizy skupień wskazał wzajemne podobieństwa biomasy badanych gatunków SRWC i sposobów wzbogacenia gleby, pod względem jej parametrów jako biopaliwa stałego (rys. 15). Analiza ta wykazała, że pod względem analizowanych cech biomasy przy odcięciu 2/3 D_{max} wyodrębnione zostały dwa klastry (rys. 15a). W jednym klastrze znalazły się zawartość węgla związanego, S, N i Cl, a w drugim klastrze pozostałe sześć analizowanych parametrów. Z kolei przy odcięciu 1/3 Dmax wyodrębnionych zostało aż sześć klastrów. Z kolei w przypadku analizy podobieństw badanych gatunków SRWC i sposobów wzbogacenia gleby stwierdzono, że przy odcięciu 2/3 Dmax powstały dwa klastry (rys. 15b). Robinia akacjowa niezależnie od sposobu wzbogacenia gleby utworzyła własny klaster. Natomiast topola i wierzba utworzyły drugi wspólny klaster. Z kolei przy odcięciu 1/3 Dmax wyodrębnione zostały cztery klastry. Robinia akacjowa dalej stanowiła jeden oddzielny klaster. Ponadto powstały trzy oddzielne klastry. Z tego w jednym znalazło się większość wariantów wzbogacenia gleby w uprawie topoli, oprócz wariantu F. W drugim klastrze znalazły się topola i wierzba w wariantach F oraz wierzba w wariancie C. Natomiast w trzecim klastrze znalazły się wszystkie pozostałe warianty wzbogacenia gleby w uprawie wierzby.

Odrębność jakości biomasy robinii akacjowej od biomasy wierzby i topoli wyraźnie zobrazowały również wybrane statystyki opisowe (**P2**). W przypadku wilgotności biomasy mediana dla robinii akacjowej wynosiła 38%, a wartość maksymalna tylko niespełna 43%, co jest korzystne z punktu widzenia energetycznego wykorzystania tego gatunku. Natomiast w przypadku topoli i wierzby już mediana wilgotności była zdecydowanie wyższa (odpowiednio 56 i 50%) niż wartość maksymalna dla robinii akacjowej. Ponadto mediana zawartości N w

biomasie robinii akacjowej (0,93% s.m.) była wyższa od maksymalnych zawartości tego pierwiastka w biomasie wierzby i topoli, odpowiednio 0,52% s.m. i 0,63% s.m. Również mediana oraz maksymalna zawartość S i Cl w biomasie robinii akacjowej były wyższe od analogicznych wartości w biomasie wierzby i topoli. Te wyższe zawartości N, S i Cl w biomasie robinii akacjowej są niekorzystne z punktu widzenia energetycznego wykorzystania tego gatunku. Z kolei zawartość C oraz ciepło spalania biomasy robinii akacjowej były niższe od analogicznych wartości dla biomasy wierzby i topoli, chociaż różnice te nie były już tak duże jak w przypadku powyżej opisanych parametrów. Z kolei spośród SRWC topola charakteryzowała się najwyższymi maksymalnymi wartościami wilgotności biomasy, zawartości popiołu, C oraz ciepła spalania. Natomiast wierzba charakteryzowała się najniższymi maksymalnymi wartościami zawartości popiołu, S, N i Cl.

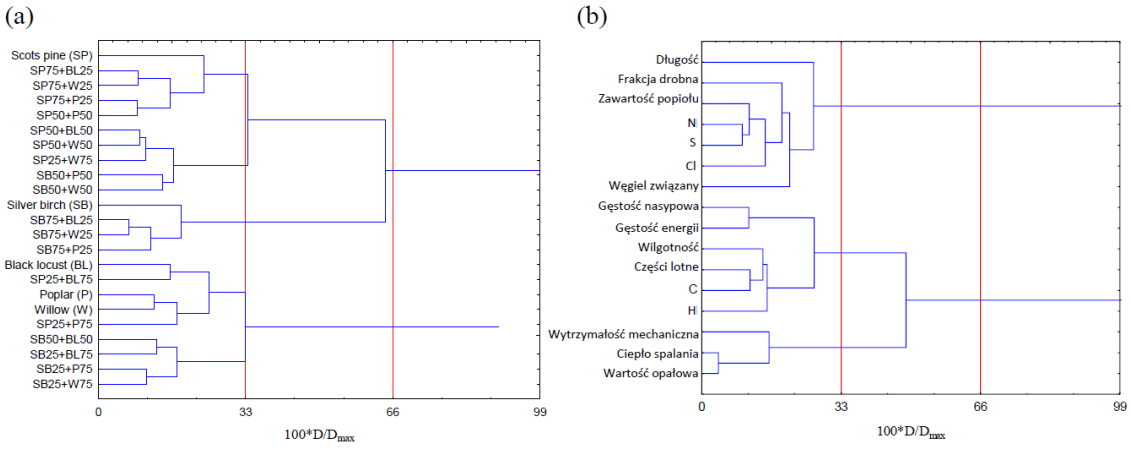


Rysunek 15. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa badanych cech (a) oraz gatunków SRWC i sposobów wzbogacenia gleby (b). Czerwoną pionową linią zaznaczono kryterium Sneath'a (2/3 D_{max}) i (1/3 D_{max}). D – miara odległości; D_{max} – maksymalna miara odległości D (źródło: opracowanie własne)

Na podstawie badań zaprezentowanych w ***P3***

Analiza skupień wykazała, że przy odcięciu 2/3 D_{max} badane pelety zostały zaklasyfikowane do dwóch różnych klastrów (rys. 16a). W jednym klastrze znalazło się 14 rodzajów peletu, w tym dwa rodzaje peletu tylko z biomasy leśnej sosny i brzozy; siedem rodzajów peletu z mieszaniny sosny z 25% i 50% udziałem wierzby lub topoli lub robinii akacjowej oraz z 75% udziałem wierzby; pięć rodzajów peletu z mieszaniny brzozy z 25% udziałem wierzby lub topoli lub robinii akacjowej oraz z 50% udziałem wierzby lub topoli. Natomiast w drugim klastrze znalazło się dziewięć rodzajów peletu, w tym trzy rodzaje peletu tylko z biomasy rolniczej SRWC wierzby, topoli i robinii akacjowej oraz sześć rodzajów peletu

z mieszaniny biomasy przeważnie z większym (75 i 50%) udziałem biomasy gatunków SRWC. Z kolei przy odcięciu 1/3 D_{max} spośród 23 rodzajów peletu wyodrębnionych zostało pięć klastrów. Pięć rodzajów peletu utworzyło jeden klaster, w tym z biomasy sosny oraz z mieszaniny sosny z 25% wierzby lub topoli lub robinii akacjowej oraz z 50% udziałem topoli. Drugi klaster utworzyło kolejnych pięć peletów, w tym z mieszaniny sosny z 50% wierzby lub robinii akacjowej i z 75% udziałem wierzby oraz z mieszaniny brzozy z 50% udziałem wierzby lub topoli. Trzeci klaster utworzył pelet z biomasy brzozy oraz z mieszaniny brzozy z 25% udziałem wierzby lub robinii akacjowej lub topoli. Czwarty klaster utworzyło pięć peletów w tym trzy z samej biomasy SRWC oraz z mieszaniny sosny z 75% udziałem topoli lub robinii akacjowej. Natomiast w piątym klasterze znalazły się cztery rodzaje peletu w tym wszystkie pelety z mieszaniny brzozy z 50% udziałem robinii akacjowej oraz 75% udziałem każdego z trzech gatunków SRWC. Również pod względem analizowanych parametrów jakościowych peletu przy odcięciu 2/3 D_{max} wyodrębnione zostały dwa klastry, a przy odcięciu 1/3 D_{max} wyodrębnione zostały trzy klastry (rys. 16b).



Rysunek 16. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa peletów (a) oraz ich właściwości (b). Czerwoną pionową linią zaznaczono kryterium Sneath'a (2/3 D_{max}) i (1/3 D_{max}). D – miara odległości; D_{max} – maksymalna miara odległości D (źródło: opracowanie własne)

Trzeba podkreślić, że w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego wzorca zawartego w normach (**P3**) tylko pelet z mieszaniny biomasy SP75+P25 odpowiadał wszystkimi zbadanymi parametrami (uwzględniając średnie wartości) najbardziej wymagającym klasom peletów –A1

(norma ISO), Premium (norma PFI), Grade 1 (norma KFRI). Natomiast w odniesieniu wyłącznie do klasy A1 wg ISO i klasy Grade 1 wg KFRI w całości spełniały je trzy rodzaje peletów: sosnowy, SP75+W25, SP75+P25, a głównym czynnikiem limitującym była zawartość popiołu. Natomiast klasę Premium (PFI) w całości spełniły cztery pelety: SP50+BL50, SP75+P25, SP50+W50, SP25+W75, a głównym czynnikiem limitującym w tym przypadku była zawartość frakcji drobnej. Tak też wzorzec dla klasy Premium był wobec peletów najbardziej restrykcyjny (szczególnie ze względu na niski poziom frakcji drobnej), mimo że normował najmniej cech. Z kolei wzorce dla klas A1 (ISO) i Grade 1 (KFRI) były restrykcyjne dla naszych peletów ze względu na niski poziom zawartości popiołu. Trzeba natomiast dodać, że wszystkie 23 rodzaje peletów spełniały wymagania co do maksymalnej średnicy, wilgotności, długości, zwartości siarki, a także minimalnej gęstości nasypowej, ciepła spalania i wartości opałowej.

Natomiast jeśli chodzi o spełnienie mniej restrykcyjnych wzorców trzech norm: ISO, PFI i KFRI, to pelet sosnowy spełniał wszystkie wymagania. Pelet brzozowy nie spełniał wymagań pięciu klas w odniesieniu do udziału frakcji drobnej. Pelet robinii akacjowej nie spełniał wymagań kilku klas w odniesieniu do wytrzymałości mechanicznej, udziału frakcji drobnej, zawartości popiołu, azotu i chloru. Pelety z topoli i wierzby nie spełniały wymagań kilku klas w odniesieniu do udziału frakcji drobnej, zawartości popiołu i azotu. Również pelety z mieszanin biomasy leśnej i rolniczej nie spełniały wymagań kilku klas w odniesieniu do różnych cech (szczegóły w **P3**). Tym nie mniej trzeba podkreślić, że nie było żadnego peletu, który nie spełniałby jakiejkolwiek klasy z analizowanych trzech norm. Co więcej należy dodać, że generalnie wszystkie pelety spełniały większość z łącznie 13 klas peletów wskazywanych przez trzy analizowane normy. Tak więc produkcja peletu z trocin drewna leśnego, jak również SRWC oraz z mieszaniny tych dwóch rodzajów biomasy jest możliwa. Oczywiście bardzo ważną kwestią jest spełnienie, bądź nie spełnienie konkretnej klasy według wybranej normy, ponieważ będzie to determinowało rynkową cenę wyprodukowanego peletu, co z kolei wpłynie na ekonomiczną efektywność całego procesu.

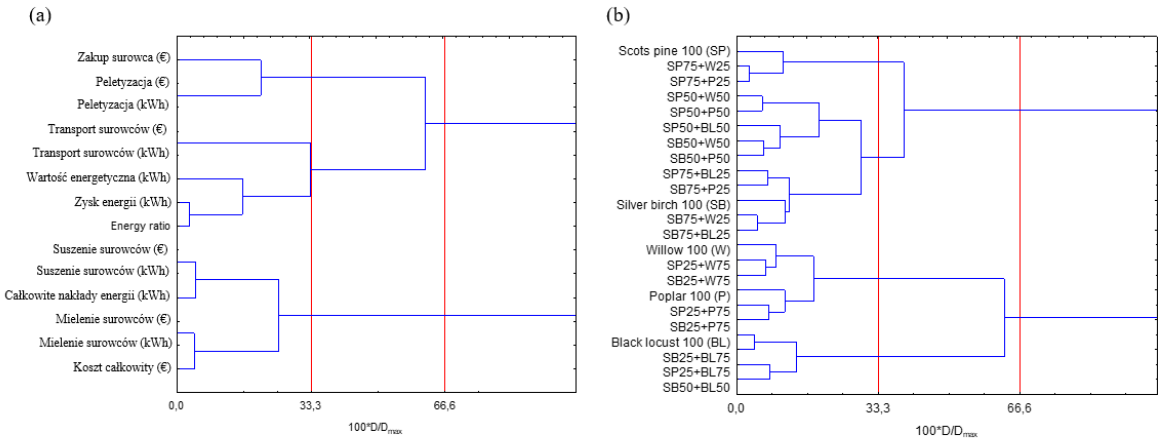
*Na podstawie badań zaprezentowanych w **P4***

Biomasa SRWC wierzby, topoli i robinii akacjowej może być surowcem do produkcji peletów obok trocin pochodzenia leśnego. Jednakże ze względu na celowy charakter uprawy SRWC, koszty i energochłonność produkcji peletu z ich biomasy będą z reguły wyższe w porównaniu do wartości uzyskiwanych dla peletów z trocin pochodzenia leśnego, które to są pozostałościami produkcyjnymi. Analizując cały łańcuch technologii produkcji peletu z

mokrych substratów stwierdzono, że najwyższe koszty były związane z kosztami zakupu surowców. Wynikało to bezpośrednio z sytuacji polityczno-gospodarczej w Europie i związanym z tym wzrostem cen wszystkich surowców energetycznych. Skutkowało to tym, że cena zakupu surowców do produkcji peletu w badaniach wynosiła średnio 10,67 € GJ^{-1} energii w nich zawartej. W związku z tym koszt zakupu surowców do produkcji peletu był najistotniejszy w strukturze kosztów całkowitych i wyniósł średnio 191,1 € Mg^{-1}. Przy czym wartość górnego kwartyla wynosiła 194,8 € Mg^{-1}, wartość maksymalna 196,4 € Mg^{-1}, a współczynnik zmienności był niski 2,5%. Natomiast pozostałe analizowane wskaźniki kosztów produkcji peletu charakteryzowały się wyższą zmiennością. Koszt transportu surowców wynosił średnio 8,7 € Mg^{-1}, a w spółczynnik zmienności 11,9%. Jeszcze wyższą zmiennością (22,3%) charakteryzowały się koszty związane z mieleniem surowców, co wynikało z ich postaci i właściwości, a średnio było to 12,3 € Mg^{-1}. Natomiast koszty suszenia surowców (średnio 74,4 € Mg^{-1}) i koszty peletyzacji (średnio 13,9 € Mg^{-1}) charakteryzowały się zmiennością na poziomie 9–10%. W odniesieniu do całkowitych nakładów energetycznych stwierdzono, że wynosiły one średnio 1843,2 kWh Mg^{-1}, a w spółczynnik zmienności wynosił 11,9%. Najistotniejszym nakładem energetycznym w strukturze nakładów całkowitych było suszenie surowców, które pochłaniało średnio 1441,0 kWh Mg^{-1}, a w spółczynnik zmienności wynosił 9,9%. Z kolei zysk energii (średnio 3024,9 € kWh^{-1}) i wskaźnik efektywności energetycznej (średnio 2,68) charakteryzowały się zmiennością odpowiednio 8,9 i 13,1%.

Analiza skupień analizowanych wskaźników ekonomicznych i energetycznych wykazała, że przy odcięciu 2/3 D_{max} zostały one zaklasyfikowane do dwóch różnych klastrów (rys. 17a). W jednym klastrze znalazły się całkowite koszty i nakłady energetyczne oraz te związane z suszeniem i mieleniem surowców. A w drugim klastrze znalazły się pozostałe analizowane wskaźniki. Natomiast przy odcięciu 1/3 D_{max} wyodrębnione zostały cztery klastry. W tym przypadku klaster pierwszy pozostał taki sam jak przy odcięciu 2/3 D_{max}. W drugim klastrze znalazły się energy ratio, zysk energii i wartość energetyczna plonu. W trzecim klastrze były koszty i nakłady związane z transportem surowców, a w czwartym te związane z peletowaniem i zakupem surowców. Natomiast w odniesieniu do analizowanych rodzajów peletów analiza skupień wykazała, że przy odcięciu 2/3 D_{max} powstały dwa różne klastry (rys. 17b). W jednym klastrze znalazło się dziesięć rodzajów peletu, w tym trzy rodzaje peletu tylko z biomasy SRWC wierzby, topoli i robinii akacjowej, sześć rodzajów peletu z mieszaniny biomasy SRWC i trocin z największym (75%) udziałem biomasy SRWC oraz jeden pelet z 50% udziałem SRWC. W drugim klastrze znalazło się pozostałe 13 rodzajów peletów, w tym dwa rodzaje peletu tylko z biomasy leśnej sosny i brzozy oraz 11 rodzajów peletu z mieszaniny

biomasy leśnej z 25% i 50% udziałem SRWC. Z kolei przy odcięciu 1/3 D_{max} spośród 23 rodzajów peletu wyodrębnione zostały cztery klastry. Trzy rodzaje peletów, w tym pelet z trocin sosnowych oraz z mieszaniny sosny z 25% udziałem wierzby lub topoli utworzyły jeden klaster. Drugi klaster utworzyły pelet z robinii akacjowej oraz z mieszaniny z 75% udziałem robinii akacjowej z sosną i brzozą i SB50+BL50. Trzeci klaster utworzyło kolejnych sześć peletów, w tym z wierzby, topoli oraz z mieszaniny sosny lub brzozy z 75% udziałem wierzby lub topoli. W czwartym klastrze znalazło się pozostałe dziesięć rodzajów peletu w tym z trocin brzozy oraz mieszanin biomasy leśnej i SRWC.



Rysunek 17. Dendrogram hierarchicznej analizy skupień przedstawiający wzajemne podobieństwa kosztów i nakładów energetycznych produkcji peletu (a) oraz ich rodzajów (b). Czerwoną pionową linią zaznaczono kryterium Sneath'a (2/3 D_{max}) i (1/3 D_{max}). D – miara odległości; D_{max} – maksymalna miara odległości D (źródło: opracowanie własne)

W związku z powyższym jest jasne, że producenci peletu najczęściej poszukują surowców suchych o jak najniższej cenie wyjściowej, ponieważ ma to bardzo istotny wpływ na koszty i nakłady energetyczne produkcji tego odnawialnego biopaliwa stałego. Tym nie mniej w przypadku braku na rynku surowców spełniających te oczekiwania można sięgnąć po inne alternatywne surowce jak chociażby biomasa SRWC, które w odpowiednich mieszaninach z biomasą pochodzenia leśnego mogą umożliwić produkcję peletu przy niezaznaczanie zmienionych kosztach i nakładach energetycznych w porównaniu do samych trocin. W badaniach szczególnie korzystne okazało się dodanie 25% biomasy wierzby lub topoli do sosny, ponieważ te trzy rodzaje peletu utworzyły jeden wspólny klaster. Jest to ważna informacja z praktycznego punktu widzenia, szczególnie w okresach niedoboru trocin

pochodzenia leśnego. Jest to tym bardziej ważne, ponieważ mieszanie różnych surowców do kopeletyzowania jest generalnie uważane za obiecujący sposób uszlachetniania peletu z biomasy, a ekonomiczne, przyjazne dla środowiska i zrównoważone surowce są warunkiem wstępnym kopeletyzowania. Co więcej, kopeletyzowanie jest coraz częściej uznawane za silną opcję dla zwiększenia konkurencyjności produkcji peletu z biomasy na dużą skalę w przyszłości (Cui i in. 2021). Dlatego też poszukiwanie różnych wariantów produkcji peletu z różnorodnych surowców biomasowych jest tym bardziej ważne i uzasadnione.

5. Wnioski

Przeprowadzenie badań polowych produkcji biomasy SRWC, wykonanie analiz laboratoryjnych oraz badania produkcji peletu z biomasy pochodzenia rolniczego, leśnego oraz ich mieszanin, jak również ocena kosztów i nakładów energetycznych ich produkcji umożliwiło pozytywne zweryfikowanie postawionych hipotez badawczych, a postawione cele pozwoliły sformułować następujące wnioski.

1. 12-letnie badania produkcji SRWC w trzech kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru na słabej glebie wykazały, że plon biomasy topoli i wierzby oraz jego wartość energetyczna były istotnie wyższe w porównaniu do wartości uzyskanych dla robinii akacjowej. Spośród badanych trzech gatunków SRWC topola była najbardziej stabilna pod względem przeżywalności roślin (średnio 90,3%) oraz wykształcała istotnie wyższe rośliny (średnio 7,09 m) o grubszych pędach (średnio 51,7 mm) w porównaniu do wierzby i robinii akacjowej. Dlatego topola charakteryzowała się najwyższym plonem suchej masy (średnio 9,1 Mg ha^{-1} rok^{-1} s.m.) oraz średnią wartością energetyczną plonu. Natomiast plon wierzby i robinii akacjowej był niższy średnio o odpowiednio 6,5% i 47,5%. Z kolei wierzba wyróżniała się tym, że plonowała najwyżej w pierwszej rotacji zbioru, a dodatkowo w wariancie uprawy przy wzbogaceniu gleby ligniną, szczepionką mikoryzową i nawożeniem mineralnym (LFM) dała najwyższy całkowity plon biomasy (134,59 Mg ha^{-1} s.m.) i ilość energii (2176,95 GJ ha^{-1}) za okres 12 lat uprawy. Z kolei najwyższe całkowite plony biomasy topoli i robinii akacjowej uzyskano w obiektach, gdzie zastosowano ligninę i nawożenie mineralne i były one niższe odpowiednio o 1,9% i 33,7% w porównaniu do najwyższej wartości uzyskanej dla wierzby.
2. Zastosowane sposoby wzbogacenia gleby generalnie wpłynęły pozytywnie na wzrost i rozwój SRWC, a tym samym na plon biomasy i jego wartość energetyczną w porównaniu do obiektów kontrolnych (C). Najlepsze efekty uzyskano w wariantach, w których elementem wzbogacenia gleby była lignina (L), słabsze natomiast było oddziaływanie samego nawożenia mineralnego, zastosowanie szczepionki mikoryzowej oraz jednoczesne zastosowanie tych dwóch czynników. Najniższe różnice pomiędzy obiektem kontrolnym, a zastosowanymi sposobami wzbogacenia gleby stwierdzono w przypadku topoli co oznacza, że gatunek ten dobrze plonował również w wariantach kontrolnych.

3. Gatunek SRWC w największym stopniu determinował wilgotność biomasy, zawartość popiołu, azotu, ciepło spalania i wartość opałową. Z punktu widzenia wilgotności i wartości opałowej biomasy SRWC w okresie zbioru najbardziej korzystnymi z energetycznego punktu widzenia, czyli najniższą wilgotnością (średnio 38,89%) i najwyższą wartością opałową (10,25 GJ Mg^{-1}) charakteryzowała się robinia akacjowa, a najgorzej pod tym względem wypadła topola. Jednakże biomasa robinii akacjowej charakteryzowała się istotnie najwyższą zawartością siarki (średnio 0,033% s.m.), azotu (średnio 0,91% s.m) i chloru (średnio 0,032% s.m.). Z kolei topola charakteryzowała się najwyższą wartością ciepła spalania (średnio 19,84 GJ Mg^{-1} s.m.) i zawartością węgla (53,46% s.m.) co było korzystne, ale z drugiej strony zawierała ona najwięcej popiołu (średnio 1,67% s.m.) i wilgoci (56,52%), co już nie jest pożądane. Natomiast wierzba charakteryzowała się najniższą zawartością popiołu (średnio 1,25% s.m.), azotu (średnio 0,38% s.m.) i chloru (średnio 0,19% s.m.) oraz pośrednią wilgotnością.
4. Rotacja zbioru w dużym stopniu wpływała na zawartość węgla, wodoru i chloru w biomasie, a zawartość siarki była determinowana głównie przez interakcję trzech głównych czynników (gatunek, sposób wzbogacenia gleby i rotacja zbioru) oraz przez sam gatunek rośliny. Dlatego też w praktyce należy oczekiwać większej zmienności zawartości poszczególnych pierwiastków w biomasie SRWC pozyskiwanej z plantacji zlokalizowanych w różnych warunkach siedliskowych przy stosowaniu różnych rodzajów i poziomów nawożenia, pomimo uprawy w tych miejscach tych samych gatunków SRWC.
5. Istnieją możliwości modyfikowania składu biomasy SRWC poprzez dobór odpowiednich gatunków do uprawy oraz przez zarządzanie plantacjami, co może być wykorzystane do optymalizacji jakości biomasy drzewnej pozyskiwanej z plantacji polowych do wybranych technologii konwersji. Jednakże aby wskazać na konkretne zastosowania konieczna jest współpraca i wymiana informacji pomiędzy producentami SRWC i końcowymi użytkownikami tej biomasy, co w obecnej dynamicznej i trudnej sytuacji polityczno-gospodarczej oraz dynamicznych zmianach na rynku surowców energetycznych nabiera szczególnie dużego znaczenia, chociażby z punktu widzenia częściowego zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego poprzez dostawy odpowiedniej ilości i jakości biomasy SRWC.
6. Potwierdzono możliwość i zasadność produkcji peletu z mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego oraz z plantacji SRWC. Stwierdzono, że nie tylko pelety z trocin pochodzenia leśnego (sosny i brzozy), które są obecnie głównymi surowcami

wejściowymi, charakteryzowały się korzystnymi właściwościami termofizycznymi i składem elementarnym, ale również dodatek biomasy SRWC (wierzby, topoli i robinii akacjowej) do tych trocin umożliwiał uzyskanie peletów, które w większości parametrów spełniały wymagania norm jakościowych dla peletów ISO, PFI i KRFI.

7. Trzeba jednak podkreślić, że jakość uzyskanego peletu z mieszaniny biomasy pogarszała się (głównie w odniesieniu do wzrostu zwartości popiołu, azotu, siarki czy chloru) wraz ze wzrostem udziału biomasy SRWC w stosunku do czystych trocin z drewna leśnego. Tym nie mniej badania wykazały, że biomasa SRWC jest pełnowartościowym materiałem, który może być uzupełnieniem i rozszerzeniem podaży rodzajów surowców, które można wykorzystać do produkcji peletów, przy jednoczesnym zachowaniu cech jakościowych tego biopaliwa stałego.
8. Ze względu na różnorodność i zmienność biomasy SRWC od biomasy pochodzenia leśnego, należy wskazać, że dodatek 25% biomasy wierzby lub topoli do trocin sosnowych pozwalał zachować badane cechy wyprodukowanego peletu na najwyższym poziomie wskazywanym przez normy jakościowe. Dlatego też w odniesieniu wyłącznie do klasy A1 według normy ISO i klasy Grade 1 według normy KFRI w całości spełniały je trzy rodzaje peletów: (i) sosnowy; (ii) z mieszaniny sosny 75% i wierzby 25% – SP75+W25; (iii) z mieszaniny sosny 75% i topoli 25% – SP75+P25. Z kolei w odniesieniu do najbardziej restrykcyjnego wzorca zawartego w normach ISO (klasa A1), PFI (klasa Premium), KFRI (klasa Grade 1), tylko pelet z mieszaniny biomasy SP75+P25 odpowiadał wszystkimi zbadanymi parametrami najbardziej wymagającym klasom peletów z tych norm, a głównym czynnikiem limitującym w tym przypadku był udział frakcji drobnej.
9. Spośród wszystkich wyprodukowanych 23 rodzajów peletu nie było żadnego, który nie spełniałby jakiejkolwiek klasy z analizowanych trzech norm. W związku z powyższym należy podkreślić, że przedstawione badania i ich wyniki mogą być podstawą do uwzględnia biomasy SRWC w tworzeniu mieszanin z biomasą drzewną pochodzenia leśnego do produkcji peletu, co byłoby ważne zarówno z punktu widzenia producentów jak i użytkowników końcowych tego bardzo ważnego biopaliwa stałego.
10. Najniższe koszty (339,7 € Mg^{-1}) i nakłady energetyczne (1448 kWh Mg^{-1}) produkcji peletu stwierdzono w przypadku trocin sosny. Koszty produkcji peletu z topoli i wierzby były wyższe w zakresie odpowiednio 5-6%, a z robinii akacjowej o 8,5% w porównaniu do peletu sosnowego. Natomiast nakłady energetyczne produkcji peletu z wierzby, robinii akacjowej i topoli były wyższe o 48,1; 50,4 i 53,2%. W strukturze kosztów i

nakładów energetycznych produkcji peletów zdecydowanie największy udział stanowiły odpowiednio, koszty zakupu surowców (50,3–57,8%) i nakłady energetyczne na ich suszenie (74,6–82,6%). Zwiększanie udziału SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do sosny i brzozy powodowało wzrost kosztów i energochłonności oraz spadek efektywności energetycznej produkcji peletów z tych mieszanin. Trzy pelety: sosnowy i te z dodatkiem 25% wierzby lub topoli utworzyły jeden wspólny klaster.

11. Produkcja peletu z samych trocin sosny i brzozy charakteryzowała się niższymi kosztami i nakładami energetycznymi w porównaniu do jego produkcji z biomasy SRWC (wierzby, topoli i robinii akacjowej). Produkcja peletu z samej biomasy SRWC była droższa i bardziej energochłonna w porównaniu do trocin, ponieważ biomasa ta musiała być specjalnie wyprodukowana oraz przygotowana do procesu peletyzacji. Dlatego też koszty i nakłady energetyczne związane z produkcją biomasy SRWC oraz jej suszeniem i mieleniem były wyższe niż w przypadku trocin, które to były pozostałością poprodukcyjną.
12. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z trocin sosny i brzozy (3,3–3,5) był wyższy niż w przypadku SRWC (ok. 2,2). Tym nie mniej wykazano, że dodatek 25% biomasy SRWC do trocin umożliwiał uzyskanie peletów, dla których wskaźnik efektywności energetycznej przekroczył wartość 3,0. Zwiększanie udziału biomasy SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do trocin sosny i brzozy powodowało wzrost kosztów i energochłonności oraz spadek wskaźników efektywności energetycznej produkcji peletów powstałych z tych mieszanin. Mimo tego należy uznać, że biomasa SRWC może być uwzględniania w produkcji peletu w mieszaninach z biomasą drzewną pochodzenia leśnego, ponieważ jest to ważne zarówno z punktu widzenia producentów jak i użytkowników końcowych peletu, szczególnie w sytuacji dynamicznych zmian na rynku surowców energetycznych i gdy na rynku mogą występować niedobory surowca w postaci trocin pochodzenia leśnego.

6. Powiązanie badań z działalnością przedsiębiorstwa

Firma Quercus sp. z o.o., w której zatrudniony jest doktorant zajmuje się produkcją i logistyką biomasy stałej na cele energetyczne. Spółka jest zainteresowana uzyskaniem ważnych informacji z innowacyjnego i gospodarczego aspektu oraz doświadczenia w zakresie dostępności i zróżnicowania jakości różnych rodzajów biomasy drzewnej (dendromasy) pochodzenia leśnego i rolniczego. Przeprowadzone badania w zakresie charakterystyki morfologicznej roślin, plonowania, wartości energetycznej plonu, właściwości termofizycznych i składu elementarnego biomasy trzech gatunków SRWC (robinii akacjowej, topoli i wierzby) z różnych wariantów wzbogacenia gleby w kolejnych czteroletnich rotacjach zbioru przez okres 12 lat uprawy w pełni wychodzą naprzeciw tym oczekiwaniom. Dzięki tym wynikom firma uzyskała bardzo ważną wiedzę w zakresie charakterystyki właściwości fizycznych gatunków, potencjału plonowania i zmian jakości dendromasy SRWC, która umożliwiła przygotowanie i wdrożenie procedur postepowania w kontaktach z kontrahentami oraz w planowaniu logistyki biomasy.

Wykazano bowiem, że istnieją możliwości modyfikowania składu biomasy SRWC poprzez dobór odpowiednich gatunków do uprawy oraz przez zarządzanie plantacjami, co może być wykorzystane do optymalizacji jakości biomasy drzewnej pozyskiwanej z plantacji polowych SRWC do wybranych technologii konwersji. Jednakże aby wskazać na konkretne zastosowania konieczna jest dalsza współpraca i wymiana informacji pomiędzy producentami SRWC i końcowymi użytkownikami tej biomasy, co w obecnej dynamicznej i trudnej sytuacji polityczno-gospodarczej oraz w okresie dynamicznych zmian na rynku surowców energetycznych nabiera szczególnie dużego znaczenia, chociażby z punktu widzenia częściowego zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego poprzez dostawy odpowiedniej ilości i jakości biomasy SRWC. Trzeba tu również dodać, że aspekt ten jest również bardzo ważny z punktu widzenia firmy Quercus sp. z o.o., krajowej firmy działającej głównie na lokalnym rynku północno-wschodniej Polski.

Przeprowadzone badania produkcji 5 rodzajów peletu z czystej biomasy (100%), w tym trzech gatunków biomasy rolniczej SRWC (robinia akacjowa, topola, wierzba) i dwóch gatunków biomasy leśnej (sosna i brzoza) oraz 18 rodzajów peletu mieszanego z biomasy rolniczej (trzech gatunków SRWC) i leśnej (sosna i brzoza), w udziałach wagowych 75/25%, 50/50% i 25/75% są kluczowym elementem całego doktoratu z punktu widzenia firmy Quercus sp. z o.o. Badania te wykazały całkowitą przydatność analizowanych rodzajów biomasy do

produkcji peletu. Na podstawie wyników i analiz oceny właściwości termofizycznych i składu elementarnego wyprodukowanych peletów możliwe jest określenie i wskazane optymalnych z punktu widzenia potencjalnych odbiorców i firmy wariantów produkcji peletu z mieszanin biomasy pochodzenia leśnego i rolniczego SRWC. Trzeba również podkreślić, że w obecnej trudnej i dynamicznej sytuacji politycznej, gospodarczej, społecznej oraz ekonomicznej przedstawione propozycje nowych rodzajów biopaliw stałych w postaci peletu mieszanego są bardzo istotne i mogą okazać się bardzo pomocne w planowaniu dalszej działalności firmy. Ważne jest stwierdzenie, że nie tylko pelety z trocin pochodzenia leśnego (sosny i brzozy), które są obecnie głównymi surowcami wejściowymi charakteryzowały się korzystnymi właściwościami termofizycznymi i składem elementarnym, ale również dodatek biomasy SRWC (wierzby, topoli i robinii akacjowej) do tych trocin umożliwiał uzyskanie peletów, które w większości parametrów spełniały wymagania norm jakościowych dla peletów ISO, PFI i KRFI. Informacja ta otwiera możliwości produkcji różnych rodzajów peletów w zależności od dostępności surowców w danym okresie i lokalizacji. Pomono iż, jakość uzyskanego peletu z mieszaniny biomasy pogarszała się wraz ze wzrostem udziału biomasy SRWC w stosunku do czystych trocin z drewna leśnego, to biomasa SRWC może być uzupełnieniem i rozszerzeniem podaży rodzajów surowców, które można wykorzystać do produkcji peletów, przy jednoczesnym zachowaniu cech jakościowych tego biopaliwa stałego. Należy podkreślić, że w tym zakresie szczególnie ważne z punktu widzenia firmy jest stwierdzenie, że dodatek 25% biomasy wierzby lub topoli do trocin sosnowych pozwalał zachować badane cechy wyprodukowanego peletu na najwyższym poziomie wskazywanym przez normy jakościowe w odniesieniu do klasy A1 według normy ISO i klasy Grade 1 według normy KFRI. Tak więc trzy rodzaje peletów, w tym jeden z biomasy leśnej (sosnowy) oraz dwa z mieszaniny sosny 75% i wierzby 25% i z mieszaniny sosny 75% i topoli 25% były równoważnymi jakościowo biopaliwami stałymi, a więc mogą być w pełni wartościowym paliwem dla odbiorów indywidulanych i systemowych w odniesieniu do rynku krajowego jak i międzynarodowego, co jest bardzo ważne z punktu widzenia firmy. Również informacją, że spośród wszystkich wyprodukowanych 23 rodzajów peletu nie było żadnego, który nie spełniałby jakiejkolwiek klasy z analizowanych trzech norm, jest kluczowa dla firmy. Oznacza to bowiem, że biomasa SRWC może być z powodzeniem uwzględniana w tworzeniu mieszanin z biomasą drzewną pochodzenia leśnego do produkcji peletu, co jest ważne zarówno z punktu widzenia producentów jak i użytkowników końcowych tego bardzo ważnego biopaliwa stałego.

Również wyniki badań w zakresie kosztów i nakładów energetycznych produkcji różnych rodzajów peletu z biomasy SRWC i leśnej są bardzo ważne z punktu widzenia firmy

Quercus. Stwierdzono, że najniższe koszty i nakłady energetyczne produkcji peletu mają miejsce w przypadku trocin sosny, co wynikało z charakteru tego substratu jako pozostałość poprodukcyjna. Z kolei koszty produkcji peletu z topoli i wierzby były wyższe w zakresie odpowiednio 5-6%, a z robinii akacjowej o 8,5% w porównaniu do peletu sosnowego. Natomiast nakłady energetyczne produkcji peletu z wierzby, robinii akacjowej i topoli były wyższe o ok. 50%. Dalego zwiększanie udziału SRWC z 25% przez 50% do 75% w stosunku do sosny i brzozy powodowało wzrost kosztów i energochłonności oraz spadek efektywności energetycznej produkcji peletów z tych mieszanin. Tym nie mniej trzy rodzaje peletu: sosnowy i te z dodatkiem 25% wierzby lub topoli utworzyły jeden wspólny klaster pod względem kosztów i energochłonności produkcji. Co w połączeniu z dobrą jakością tych peletów jest bardzo ważną informacją z punktu widzenia firmy. Również wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z trocin sosny i brzozy był wyższy niż w przypadku SRWC. Wykazano jednakże, że dodatek 25% biomasy SRWC do trocin umożliwiał uzyskanie peletów, dla których wskaźnik efektywności energetycznej przekroczył wartość 3,0.

Dzięki tym kompleksowym wynikom badań firma będzie w stanie zoptymalizować pozyskiwanie surowców do produkcji biopaliwa stałego w postaci peletu z lokalnych źródeł (SRWC + biomasa leśna), dzięki czemu możliwe będzie zoptymalizowanie kosztów logistyki oraz wyprodukowanie dobrego jakościowo peletu, który to zostanie przeznaczony na cele energetyczne w lokalnych ciepłowniach/elektrociepłowniach, jak również indywidulanych kotłowaniach. Jest to ważne zarówno z punktu widzenia producentów jak i użytkowników końcowych peletu, szczególnie w sytuacji dynamicznych zmian na rynku surowców energetycznych i gdy na rynku mogą występować niedobory surowca w postaci trocin pochodzenia leśnego. Dzięki takim rozwiązaniom firma Quercus sp. z o.o. będzie miała szansę na osiągnięcie lepszych wyników oraz eksplorowanie nowych, mało rozpoznanych do tej pory rynków.

W związku z powyższym należy stwierdzić, że przeprowadzone kompleksowe badania w ramach doktoratu wdrożeniowego przyniosły wymierne praktyczne efekty w postaci opracowania metod i technik produkcji peletu z określonymi udziałami w mieszaninach biomasy leśnej i SRWC, który spełniał będzie wymagania jakościowe określone w normach, co jest bardzo ważne z punktu widzenia firmy Quercus sp. z o.o. Dzięki tym badaniom firma ma opracowane technologie i receptury oraz jest w stanie wdrożyć produkcję wybranego rodzaju peletu z mieszaniny biomasy SRWC i leśnej (o przewidywalnej jakości) w zależności od sytuacji gospodarczo-ekonomicznej na lokalnym, krajowym i międzynarodowym rynku paliwowo-energetycznym.

7. Literatura

1. Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., Rezaei, N., 2021. Qualitative characterization of the pellet obtained from hazelnut and olive tree pruning. Energies 14, 4083. https://doi.org/10.3390/en14144083.
2. Aghaalikhani, A., Savuto, E., Di Carlo, A., Borello, D., 2017. Poplar from phytoremediation as a renewable energy source: Gasification properties and pollution analysis. Energy Procedia 142, 924–931. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.148.
3. Ahmad, T., Zhang, D., 2020. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. Energy Rep. 6, 1973–1991, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.020.
4. Amaducci, S., Facciotto, G., Bergante, S., Perego, A., Serra, P., Ferrarini, A., Chimento, C., 2017. Biomass production and energy balance of herbaceous and woody crops on marginal soils in the Po Valley. GCB Bioenergy 9, 31–45. https://doi.org/10.1111/gcbb.12341.
5. Aronsson, P., Rosenqvist, H., Dimitriou, I., 2014. Impact of nitrogen fertilization to short-rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy. BioEnergy Res. 7, 993–1001. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9435-7.
6. Benetka, V., Vrátný, F., Šálková, I., 2007. Comparison of the productivity of Populus nigra L. with an interspecific hybrid in a short rotation coppice in marginal areas. Biomass Bioenergy 31, 367–374. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.005.
7. Bergante, S., Facciotto, G., 2011. Nine years measurements in Italian SRC trial in 14 poplar and 6 willow clones. In Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6–10 June 2011. pp. 6–10.
8. Bioenergy Europe 2022. European Bioenergy Outlook–Pellet Report. Brussels, pp. 116.
9. Bioenergy Europe 2023. Energy balance of wood pellet. 2023. https://epc.bioenergyeurope.org/energy-balance-of-wood-pellets/; [accessed 20 January 2023].
10. Caineng, Z., Zhao, Q., Zhang, G., Xiong, B., 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. Nat. Gas. Ind. B 3, 1–11, https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001.
11. Cardozo, E., Malmquist, A., 2019. Performance comparison between the use of wood and sugarcane bagasse pellets in a Stirling engine micro-CHP system. Appl Therm Eng 159, 113945. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113945.

12. Castaño-Díaz, M., Barrio-Anta, M., Afif-Khouri, E., Cámara-Obregón, A., 2018. Willow short rotation coppice trial in a former mining area in Northern Spain: effects of clone, fertilization and planting density on yield after five years. Forests 9, 154. https://doi.org/10.3390/f9030154.
13. Ceotto, E., Castelli, F., Moschella, A., Diozzi, M., Di Candilo, M., 2016. Poplar short rotation coppice is not a first choice crop for cattle slurry fertilization: Biomass yield and nitrogen-use efficiency. Ind. Crops Prod. 85, 167–173. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.042.
14. Civitarese, V., Acampora, A., Sperandio, G., Assirelli, A., Picchio, R., 2019. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with different harvesting cycles. Energies 12, 2973. https://doi.org/10.3390/en12152973.
15. Cui, X., Yang, J., Wang, Z., Shi, X., 2021. Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing. Carbon Capture Sci Technol 1, 100005. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100005.
16. Dao, C.N., Salam, A., Thi, N.T.K., Tabil, L.G., 2022. Effects of length-to-diameter ratio, pinewood sawdust, and sodium lignosulfonate on quality of rice straw pellets produced via a flat die pellet mill. Renew Energy 181, 1140–1154. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.088.
17. Dillen, S.Y., Djomo, S.N., Al Afas, N., Vanbeveren, S., Ceulemans, R., 2013. Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. Biomass and Bioenergy 56, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.019.
18. Directive 2009/28/EC. Directive of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
19. Directive 2018/2001/UE. Directive of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
20. Dubis, B., Jankowski, K.J., Załuski, D., Bórawski, P., Szempliński, W., 2019. Biomass production and energy balance of Miscanthus over a period of 11 years: A case study in a large-scale farm in Poland. GCB Bioenergy 11(10), 1187–1201. https://doi.org/10.1111/gcbb.12625.
21. Dubodelova, E.V., Sychova, N.A., Khmyzov, I.A., Snopkova, T.A., Solovyeva, T.V., 2012. Technology features of fuel pellets from deciduous wood. Chemistry and

Technology of Wood Processing 4, 127–129. https://elib.belstu.by/handle/123456789/6505.

22. European Commission 2022. EU Energy in Figures 2022. Statistical pocketbook. European Comission. https://doi.org/10.2833/334050.
23. Eurostat 2022a. Key figures on Europe. Eurostat. https://doi.org/10.2785/851035.
24. Eurostat 2022b. Share of energy from renewable sources. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ren/default/table?lang=en
25. Fabio, E.S., Volk, T.A., Miller, O.R., Serapiglia, M.J., Kemanian, A.R., Montes, F., Kuzovkina, Y.A., Kling, G.J., Smart, L.B., 2017. Contributions of environment and genotype to variation in shrub willow biomass composition. Ind. Crops Prod. 108, 149–161. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.030.
26. Fortier, J., Gagnon, D., Truax, B., Lambert, F., 2010. Biomass and volume yield after 6 years in multiclonal hybrid poplar riparian buffer strips. Biomass Bioenergy, 34, 1028–1040.
27. Frodeson, S., Henriksson, G., Berghel, J., 2018. Pelletizing pure biomass substances to investigate the mechanical properties and bonding mechanisms. BioResources 13, 1202–1222. https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1202-1222.
28. Garcia, D.P., Caraschi, J.C., Ventorim, G., Vieira, F.H.A., de Paula Protásio, T., 2018. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. BioResources 13, 2898–2906. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_2_2898_Garcia_Comparative_Energy_Torrefied_Pellets.
29. García, R., González-Vázquez, M.P., Rubiera, F., Pevida, C., Gil, M.V., 2021. Co-pelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. J. Clean. Prod. 328, 129635. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129635.
30. Gehrig, M., Wöhler, M., Pelz, S., Steinbrink, J., Thorwarth., H., 2019. Kaolin as additive in wood pellet combustion with several mixtures of spruce and short-rotation-coppice willow and its influence on emissions and ashes. Fuel 235, 610–616. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.028.
31. Geyer, W.A., 2006. Biomass production in the Central Great Plains USA under various coppice regimes. Biomass Bioenergy 30, 778–783. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.011.

32. Gillespie, G.D., Everard, C.D., Fagan, C.C., McDonnell, K.P., 2013. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. Fuel 111, 771–777. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.002.
33. Gruenewald, H., Böhm, C., Quinkenstein, A., Grundmann, P., Eberts, J., von Wühlisch, G., 2009. Robinia pseudoacacia L.: a lesser known tree species for biomass production. Bioenergy Res. 2, 123–133. https://doi.org/10.1007/s12155-009-9038-x.
34. Gruenewald, H., Brandt, B.K.V., Schneider, B.U., Bens, O., Kendzia, G., Hüttl, R.F., 2007. Agroforestry systems for the production of woody biomass for energy transformation purposes. Ecol. Eng. 29, 319–328. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.012.
35. Guidi, W., Tozzini, C., Bonari, E., 2009. Estimation of chemical traits in poplar short-rotation coppice at stand level. Biomass Bioenergy 33, 1703–1709. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.004.
36. GUS 2022. Energy from renewable sources in 2021. Warsaw, pp. 96.
37. Jacobson, M., Ciolkosz, D., 2020. Plantation forestry and pellet production in Kenya. Biomass Bioenergy 135, 105519. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105519.
38. 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, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121545.
39. Jankowski, K.J., Dubis, B., Sokólski, M., Załuski, D., Bórawski, P., Szempliński, W., 2019. Biomass yield and energy balance of Virginia fanpetals in different production technologies in north-eastern Poland. Energy 185, 612–623. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.061.
40. 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, 112326. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112326.
41. Jankowski, K.J., Sokólski, M., Szatkowski, A., Kozak, M., 2022. Crambe – Energy efficiency of biomass production and mineral fertilization. A case study in Poland. Ind. Crops Prod. 182, 114918. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114918.
42. 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.

43. Jasinskas, A., Kleiza, V., Streikus, D., Domeika, R., Vaiciukevičius, E., Gramauskas, G., Valentin, M.T., 2022. Assessment of quality indicators of pressed biofuel produced from coarse herbaceous plants and determination of the influence of moisture on the properties of pellets. Sustainability 14(3), 1068. https://doi.org/10.3390/su14031068.
44. Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Warmiński, K., 2019. Life cycle assessment of poplar production: Environmental impact of different soil enrichment methods. J. Clean. Prod. 06, 785–796. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.180.
45. Labrecque, M., Teodorescu, T.L., 2005. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). Biomass Bioenergy 29(1), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.12.004.
46. Larsen, S.U., Jørgensen, U., Lærke, P.E., 2014. Willow yield is highly dependent on clone and site. Bioenergy Res. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9463-3.
47. Latterini, F., Civitarese, V., Walkowiak, M., Picchio, R., Karaszewski, Z., Venanzi, R., Bembenek, M., Mederski, P.S., 2022. Quality of pellets obtained from whole trees harvested from plantations, coppice forests and regular thinnings. Forests 13, 502. https:// doi.org/10.3390/f13040502.
48. Maj, G., Krzaczek, P., Gołębiowski, W., Słowik, T., Szyszlak-Bargłowicz, J., Zając, G., 2022. Energy consumption and quality of pellets made of waste from corn grain drying process. Sustainability 14(13), 8129. https://doi.org/10.3390/su14138129.
49. Manzone, M., Bergante, S., Facciotto, G., 2014. Energy and economic evaluation of a poplar plantation for woodchips production in Italy. Biomass Bioenergy 60, 164–170. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.012.
50. Masche, M., Puig-Arnavat, M., Jensen, P.A., Holm, J.K., Clausen, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., 2019. From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. Powder Technol 350, 134–145.
51. Matyka, M., Radzikowski, P., 2020. Productivity and biometric characteristics of 11 varieties of willow cultivated on marginal soil. Agriculture 10(12), 616. https://doi.org/10.3390/agriculture10120616.
52. Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F., Arranz, J., Rojas, C., Nogales, S., 2015. A review of pellets from different sources. Materials 8, 1413–1427. https://doi.org/10.3390/ma8041413.

53. Mobini, M., Sowlati, T., Sokhansanj, S.A., 2013. simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. Appl Energy 111, 1239–1249. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.026.
54. Monedero, E., Portero, H., Lapuerta, M., 2015. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. Fuel Process. Technol. 132, 15–23. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.013.
55. Monedero, E., Portero, H., Lapuerta, M., 2015. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. Fuel Process. Technol. 132, 15–23. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.013.
56. Nabavi, V., Azizi, M., Tarmian, A., Ray, C.D., 2020. Feasibility study on the production and consumption of wood pellets in Iran to meet return-on-investment and greenhouse gas emissions targets. Renew Energy 151, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.140.
57. Neeft, J., Gagnepain, B., Bacovsky, D., Lauranson, R., Georgakopoulos, K., Fehrenback, H., et al., 2011. Harmonized calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe. BioGrace.
58. Nordborg, M., Berndes, G., Dimitriou, I., Henriksson, A., Mola-Yudego, B., Rosenqvist, H., 2018. Energy analysis of willow production for bioenergy in Sweden. Renew. Sustain. Energy Rev. 93, 473–482. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.045.
59. Nord-Larsen, T., Sevel, L., Raulund-Rasmussen, K., 2015. Commercially grown short rotation coppice willow in Denmark: Biomass production and factors affecting production. BioEnergy Res. 8, 325–339. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9517-6.
60. Núñez-Retana, V., Rosales-Serna, R., Prieto-Ruíz, J., Wehenkel, C., Carrillo-Parra, A., 2020. Improving the physical, mechanical and energetic properties of Quercus spp. wood pellets by adding pine sawdust. Peerj 8, e9766, https://doi.org/10.7717/peerj.9766.
61. Pacaldo, R., Volk, T., Briggs, R., 2014. Carbon sequestration in fine roots and foliage biomass offsets soil CO2 effluxes along a 19-year chronosequence of shrub willow (Salix x dasyclados) biomass crops. Bioenergy Res. 7, 769–776. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9416-x.

62. Pearson, C.H., Halvorson, A.D., Moench, R.D., Hammon, R.W., 2010. Production of hybrid poplar under short-term, intensive culture in Western Colorado. Ind. Crop. Prod. 31, 492–498. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.01.011.
63. Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., Pari, L., 2020. Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. Energies 13, 2937. https://doi.org/10.3390/en13112937.
64. Quaye, A.K., Volk, T.A., Hafner, S., Leopold, D.J., Schirmer, C., 2011. Impacts of paper sludge and manure on soil and biomass production of willow. Biomass Bioenergy 35(7), 2796–2806. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.03.008.
65. Rashedi, A., Gul, N., Hussain, M., Hadi, R., Khan, N., Nadeem, S.G., et al., 2022. Life cycle environmental sustainability and cumulative energy assessment of biomass pellets biofuel derived from agroforest residues. PLoS ONE 17(10), e0275005. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275005.
66. Rédei, K., Veperdi, I., 2009. The role of black locust (Robinia pseudoacacia L.) in establishment of short-rotation energy plantations in Hungary. Int. J. Hortic. Sci. 15(3), 41–44. https://doi.org/10.31421/IJHS/15/3/832.
67. Sabatti, M., Fabbrini, F., Harfouche, A., Beritogenolo, I., Mareschi, L., Carlini, M., Paris, P., Scarascia-Mugnozza, G., 2014. Evaluation of biomass production potential and heating value of hybrid poplar genotypes in a short-rotation culture in Italy. Ind. Crops Prod. 61, 62–73. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.043.
68. 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.
69. Serapiglia, M.J., Cameron, K.D., Stipanovic, A.J., Abrahamson, L.P., Volk, T.A., Smart, L.B., 2013. Yield and woody biomass traits of novel shrub willow hybrids at two contrasting sites. Bioenergy Res. 6, 533–546. https://doi.org/10.1007/s12155-012-9272-5.
70. Sevel, L., Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Jørgensen, U., Raulund-Rasmussen, K., 2014. Fertilization of SRC willow, I: biomass production response. Bioenergy Res. 7, 319–328. https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-013-9371-y.

71. Sleight, N.J., Volk, T.A., Johnson, G.A., Eisenbies, M.H., Shi, S., Fabio, E.S., Pooler, P.S., 2016. Change in yield between first and second rotations in willow (Salix spp.) biomass crops is strongly related to the level of first rotation yield. BioEnergy Res. 9, 270–287. https://doi.org/10.1007/s12155-015-9684-0.
72. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Załuski, D., Bieniek, A., Gołaszewski, J., 2015. Effect of increased soil fertility on the yield and energy value of short-rotation woody crops. BioEnergy Res. 8, 1136–1147. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9567-9.
73. 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.
74. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworkowski, J., Szczukowski, S., 2017. Perennial herbaceous crops as a feedstock for energy and industrial purposes: Organic and mineral fertilizers versus biomass yield and efficient nitrogen utilization. Ind. Crops Prod. 107, 244-259. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.059.
75. Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Załuski, D., Tworkowski, J., Szczukowski, S., 2020b. Effects of site, genotype and subsequent harvest rotation on willow productivity. Agriculture 10, 0412. https://doi.org/10.3390/agriculture10090412.
76. Stolarski, M.J., Śnieg, M., Krzyżaniak, M., Tworkowski, J., Szczukowski, S., 2018. Short rotation coppices, grasses and other herbaceous crops: Productivity and yield energy value versus 26 genotypes. Biomass and Bioenergy 119, 109–120. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.014.
77. Stolarski, M.J., Stachowicz, P., Dudziec, P., 2022a. Wood pellet quality depending on dendromass species. Renew Energy 199, 498–508. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.015.
78. Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Klasa, A., 2013. Yield, energy parameters and chemical composition of short-rotation willow biomass. Ind. Crops Prod. 46, 60-65. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.012.
79. Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Załuski, D., 2019a. Willow production during 12 consecutive years—The effects of harvest rotation, planting density and cultivar on biomass yield. GCB Bioenergy 11, 635–656. https://doi.org/10.1111/gcbb.12583.

80. Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., 2020a. Energy value of yield and biomass quality of poplar grown in two consecutive 4-year harvest rotations in the north-east of Poland. Energies 13, 1495. https://doi.org/10.3390/en13061495.
81. Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., 2022b. Cascaded use of perennial industrial crop biomass: The effect of biomass type and pre-treatment method on pellet properties. Ind. Crops Prod. 185, 115104. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115104.
82. Stolarski, M.J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., Olba–Zięty, E., Stachowicz, P., 2020. Energy consumption and heating costs for a detached house over a 12-year period – Renewable fuels versus fossil fuels. Energy 204, 117952. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117952.
83. Szeptycki, A., Wójcicki, Z., 2003. Technical development and energy inputs in agriculture till 2020. IBMER 2003.
84. Tharakan, P.J., Volk, T.A., Nowak, C.A., Abrahamson, L.P., 2005. Morphological traits of 30 willow clones and their relationship to biomass production. Can. J. For. Res. 35(2), 421–431. https://doi.org/10.1139/x04-195.
85. Thiffault, E., Barrette, J., Blanchet, P., Nguyen, Q.N., Adjalle, K., 2019. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues. Forests 10, 607. https://doi.org/10.3390/f10070607.
86. Thomson, H., Liddell, Ch., 2015. The suitability of wood pellet heating for domestic households: A review of literature. Renew Sust Energ Rev 42, 1362–1369. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.009.
87. Tumuluru, J.S., 2016. Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill. Chem Eng Res Des 110, 82-97. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.04.007.
88. Tumuluru, J.S., 2019. Pelleting of pine and switchgrass blends: Effect of process variables and blend ratio on the pellet quality and energy consumption. Energies 12(7), 1198. https://doi.org/10.3390/en12071198.
89. Visser, L., Hoefnagels, R., Junginger, M., 2020. Wood pellet supply chain costs – a review and cost optimization analysis. Renew Sust Energ Rev 118, 109506. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109506.
90. Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S.L., Maliarenko, O., Eleftheriadis, I., Zanetti, F., Monti, A., Lazdina, D., Neimane, S., Lamy, I., Ciadamidaro, L., Sanz, M.,

Esteban Carrasco, J., Ciria, P., McCallum, I., Trindade, L.M., van Loo, E.N., Elbersen, W., Fernando, A.L., Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., 2019. Marginal agricultural land low-input systems for biomass production. Energies 12, 3123. https://doi.org/10.3390/en12163123.

91. Warmiński, K., Stolarski, M.J., Gil, Ł., Krzyżaniak, M., 2021. Willow bark and wood as a source of bioactive compounds and bioenergy feedstock. Ind. Crops Prod. 171, 113976. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113976.
92. Wilkinson, J.M., Evans, E.J., Bilsborrow, P.E., Wright, C., Hewison, W.O., Pilbeam, D.J., 2007. Yield of willow cultivars at different planting densities in a commercial short rotation coppice in the north of England. Biomass Bioenergy 31(7), 469–474. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.020.
93. Wiloso, E.I., Setiawan, A.A.R., Prasetia, H., Muryanto, Wiloso A.R., Subyakto, Sudiana, I.M., Lestari, R., Nugroho, S., Hermawan, D., Fang, K., Heijungs, R., 2020. Production of sorghum pellets for electricity generation in Indonesia: A life cycle assessment. Biofuel Res J 27:1178-1194. https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.3.2.
94. Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiewicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska I., et al., 2020. The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. Renew Energy 145, 997–1003. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051.

8. Oświadczenia współautorów

Olsztyn, 17.04.2023 r.

mgr Paweł Stachowicz
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
Katedra Genetyki, Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców

Oświadczenie o współautorstwie w publikacjach

Oświadczam, że w pracy:
P1. Stolarski M.J., Stachowicz P. 2023. Black locust, poplar or willow? Yield and energy value in three consecutive four-year harvest rotations. Industrial Crops and Products, 193, 116197, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116197. (IF 6.449; 200 pkt).
Mój udział polegał na dostarczeniu i utrzymywaniu części danych badawczych, wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 40%.

P2. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Thermophysical properties and elemental composition of black locust, poplar and willow biomass. Energies, 16, 305. https://doi.org/10.3390/en16010305 (IF: 3.252; 140 pkt).
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, pozyskaniu finansowania i wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, wizualizacji danych, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 55%.

P3. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Short rotation woody crops and forest biomass sawdust mixture pellet quality. Industrial Crops and Products, 197, 116604, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116604. (IF: 6.449; 200 pkt).
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, wizualizacji danych, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy, administracji nad projektem. Mój udział szacuję na 60%.

P4. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Pellets from mixtures of short rotation woody crops with forest-derived biomass: Production costs and energy intensity. – *Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Renewable Energy (IF: 8.634; 140 pkt).*
M ój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, wizualizacji danych, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy, administracji nad projektem. Mój udział szacuję na 65%.

.....
(podpis)

Olsztyn, 17.04.2023 r.

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

Oświadczenie o współautorstwie w publikacjach

Oświadczam, że w pracy:

P1. Stolarski M.J., Stachowicz P. 2023. Black locust, poplar or willow? Yield and energy value in three consecutive four-year harvest rotations. Industrial Crops and Products, 193, 116197, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116197. (IF 6.449; 200 pkt).
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, pozyskaniu finansowania i wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, wizualizacji danych, nadzorze i administracji nad projektem, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 60%.

P2. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Thermophysical properties and elemental composition of black locust, poplar and willow biomass. Energies, 16, 305. https://doi.org/10.3390/en16010305 (IF: 3.252; 140 pkt).
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, pozyskaniu finansowania i wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, wizualizacji danych, nadzorze i administracji nad projektem, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 45%.

P3. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Short rotation woody crops and forest biomass sawdust mixture pellet quality. Industrial Crops and Products, 197, 116604, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116604. (IF: 6.449; 200 pkt).
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, pozyskaniu finansowania i wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, nadzorze nad projektem, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 40%.

P4. Stachowicz P., Stolarski M.J. 2023. Pellets from mixtures of short rotation woody crops with forest-derived biomass: Production costs and energy intensity – *Praca na etapie recenzji w czasopiśmie Renewable Energy (IF: 8.634; 140 pkt).*
Mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodyki, dostarczeniu i utrzymywaniu danych badawczych, pozyskaniu finansowania i wykonaniu części badań, opracowaniu wyników badań, analizie i walidacji danych, nadzorze nad projektem, pisaniu i redakcji oryginalnej (wstępnej) i końcowej (po recenzjach) wersji pracy. Mój udział szacuję na 35%.

Jednocześnie wyrażam zgodę, aby powyższe prace zostały wykorzystane w rozprawie doktorskiej Pana mgr Pawła Stachowicza.

.....
(podpis)