

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr Pawła Stachowicza
pt.: „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz
wytwarzanie z niej peletu”
wykonanej na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie,
Wydział Rolnictwa i Leśnictwa
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

Trwające od 1751 r. emisje dwutlenku węgla, związane z rewolucją Przemysłową, można opisać za pomocą funkcji wykładniczej, w której emisje rosną o stałą wartość 2,8% rocznie, co skutkuje ich podwojeniem co 25 lat. W 2020 roku globalna emisja dwutlenku wynosiła 36,3 mld ton, a największy udział (%) w emisji mają Chiny – 29, USA – 14, UE – 8, w tym Niemcy – 2, Indie – 7, Federacja Rosyjska – 4, Japonia – 3, reszta świata – 33. Dekarbonizacja gospodarki lansowana przez Komisję Europejską odstaje od światowych trendów ekonomicznych i geopolitycznych, gdzie paliwa kopalne dominują.

Kraje UE chcą ograniczyć do 2030 roku, w porównaniu z 1990 rokiem emisje CO₂ o 50%, do poziomu 2238 mln t. W 2021 roku w UE emisja CO₂ wyniosła 2813 mln t, co oznacza, że do roku 2030 emisje CO₂ należy obniżać średniorocznie o 64 mln t. Tymczasem Chiny w latach 2019 – 2021 zwiększyły emisje CO₂ o 750 mln t, co oznacza średnioroczny wzrost na poziomie 375 mln t i jest wartością 6. krotnie wyższą od planowanych na lata 2022 -2030 przez UE średniorocznych redukcji.

Emisje CO₂ w UE powoli spadają. Węgiel jest w głębokim odwrocie i zastępują go odnawialne źródła energii oraz gaz ziemny, który uważany jest przez Komisję Europejską obok energii atomowej za zieloną energię. UE przyjęła cel neutralności klimatycznej (obniżenia wypadkowych emisji gazów cieplarnianych do zera) do 2050 r.

Unia Europejska (UE) importuje blisko 60% potrzeb energetycznych. Należy zaznaczyć, że aktualnie żadne z państw członkowskich UE nie jest samowystarczalne w zakresie swoich potrzeb energetycznych dlatego jednym z podstawowych priorytetów dla UE

jest zwiększanie niezależnienia się od zewnętrznych surowców energetycznych. Obecna skomplikowana sytuacja polityczno-gospodarcza oraz gwałtowne wzrosty i fluktuacje cen kopalnych surowców energetycznych, a także ograniczenia w ich dostępności powodują, że OZE będą odgrywały strategiczną rolę w bilansie energetycznym.

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. Biomasa drzewna, pochodzenia rolniczego z upraw SRWC jest niejednorodnym biopaliwem, a przetworzone na pelety jest bardziej korzystna do generowania energii. Zwiększone zapotrzebowanie na trociny pochodzenia drzewnego i ograniczona ich dostępność powoduje wzrost kosztów produkcji peletu. W celu zaspokojenia potrzeb surowcowych konieczne może być też stosowanie do produkcji peletu biomasy drzewnej SRWC.

Dlatego podjęcie przez magistra Pawła Stachowicza badań nad produkcją peletu z biomasy pochodzenia rolniczego, leśnego oraz ich mieszanin, w połączeniu z oceną kosztów i nakładów energetycznych związanych z ich produkcją uważam za niezwykle cenne z poznawczego i utylitarnego punktu widzenia.

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: (A) gatunku, (B) sposobu wzbogacania gleby, (C) 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.

Rozprawa doktorska oparta jest na cyklu czterech monotematycznych publikacji pod wspólnym tytułem „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz wytwarzanie z niej peletu”. Trzy pierwsze prace zostały już 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. Czwarta praca jest na etapie recenzji w czasopiśmie *Renewable Energy* (IF: 8.634; 140 pkt).

Wszystkie publikacje naukowe wchodzące w skład cyklu są oryginalnymi pracami twórczymi, które ukazały się w czasopismach naukowych z listy Journal Citation Reports, posiadających indeks wpływu IF, natomiast praca P4 jest na etapie recenzji. Sumaryczna wartość współczynnika IF dla czasopism (w roku wydania), w których opublikowano prace P1-P3, wynosi 16,15, a z nieopublikowaną pracą P4 24,784.

Przedłożone publikacje są dwuautorskie. W trzech pracach (P2, P3 i P4) Doktorant jest pierwszym autorem.

Z oświadczeń Kandydata oraz współautorów, dotyczących udziału w powstawaniu poszczególnych publikacji, wynika, że mgr Paweł Stachowicz brał udział w najistotniejszych etapach tj. opracowaniu koncepcji badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu i interpretacji wyników, dyskusji, przygotowaniu manuskryptu. Świadczy to o przeważającym udziale Doktoranta w powstawaniu tych publikacji oraz dowodzi samodzielności w poruszanej tematyce badawczej.

Wymienione wyżej cztery monotematyczne publikacje wchodzące w skład dysertacji doktorskiej omówiono pod wspólnym tytułem „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz wytwarzanie z niej peletu”. Układ tego opracowania odpowiada klasycznym rozprawom doktorskim.

W interesującym wprowadzeniu Autor omawia sytuację energetyczną UE i na tym tle analizuje uprawę i produkcję biomasy SRWC oraz ocenę jej jakości jako surowca do produkcji peletu.

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.

Przedmiot badań, hipotezy badawcze oraz cele rozprawy doktorskiej opisano wyczerpująco, a na podkreślenie zasługuje zwięzłe przedstawienie poruszanych kwestii.

Doświadczenie polowe założono wiosną w 2010 roku w ramach badań Katedry Genetyki Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców w północno-wschodniej Polsce na glebie rdzawej właściwej całkowitej wytworzonej 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 (pH KCl 6,3-7,9). Gleba ta była również okresowo za sucha, a poziom wody gruntowej znajdował się znacznie poniżej 150 cm.

W doświadczeniu polowym badano:

A - gatunki SRWC: wierzba (*Salix viminalis* L., odmiana Żubr); topola (*Populus nigra* x *P. Maximowiczii* Henry cv. Max-5) i robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia* L.);

B - 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). Ligninę jako pozostałość po produkcji wyrobów papierniczych (13,3 t ha⁻¹) zastosowano tylko raz wiosną 2010 r. przed założeniem doświadczenia, a żywą grzybnię mikoryzową oddzielnie dla każdego gatunku, zastosowano w I dekadzie września 2010 r.

Nawożenie mineralne (NPK) zastosowano trzykrotnie: przed rozpoczęciem drugiego okresu wegetacji (2011) w pierwszej rotacji zbioru oraz wiosną 2014 i 2018 roku, w następujących dawkach $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$: N – 90; P_2O_5 – 30 i K_2O – 60.

Dla badanych gatunków biomasa była pozyskiwana w czteroletnich rotacjach.

Po zakończeniu czwartego sezonu wegetacyjnego określano obsadę roślin na poletkach, a następnie wyniki przeliczano na 1 ha i na tej podstawie określono przeżywalność roślin. Z cech biometrycznych określono liczbę pędów na karpie, średnicę pędu oraz wysokość roślin.

Zbiór roślin w kolejnych czteroletnich rotacjach był wykonywany w grudniu 2013, 2017 i 2021. Z każdego poletka określono plon świeżej biomasy, a po oznaczeniu w biomacie zawartości wody wyliczono plon suchej masy.

Pelety produkowano z biomasy drzewnej pochodzącej z lasu (sosna zwyczajna i brzoza brodawkowa) oraz biomasy drzewnej, pochodzenia rolniczego z upraw SRWC (robinia akacyjowa, topola i wierzba). Wytworzono 23 rodzaje peletów, w tym 5 pochodzących z masy drzewnej poszczególnych gatunków. W pozostałych peletach udział biomasy drzewnej pochodzącej z lasu określany wagowo wynosił 75, 50 i 25%, a dopełnienie do 100% stanowiła biomasa drzewna pochodzenia rolniczego z upraw SRWC.

W peletach określono między innymi wilgotność i ciepło spalania. Ponadto porównano właściwości peletu do wybranych norm jakościowych oraz dokonano analizy kosztów i energochłonności produkcji peletu.

Przed wykonaniem analiz statystycznych, testem Shapiro-Wilk sprawdzono normalność badanych cech. Analizy statystyczne wyników oparto na analizie wariancji (ANOVA). Ponadto dla wszystkich badanych cech 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. Ponadto cech SRWC wykonano aglomeracyjną hierarchiczną analizę skupień.

Rozdział wyniki badań i dyskusja liczy ponad 50 stron. Autor na bieżąco konfrontuje wyniki swoich badań z literaturą. Pomimo bardzo dużej liczby zgromadzonych danych wyniki opracowano i opisano syntetycznie. Autor wykazał między innymi, że:

- na glebie wytworzonej z piasku luźnego plon biomasy topoli i wierzby oraz jego wartość energetyczna były istotnie wyższe w porównaniu do robinii akacyjowej. Spośród badanych trzech gatunków SRWC topola była najbardziej stabilna pod względem przeżywalności roślin oraz wykształcała istotnie wyższe rośliny o grubszych pędach w

porównaniu do wierzby i robinii akacjowej. Dlatego topola charakteryzowała się najwyższym plonem suchej masy (średnio $9,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$);

- wierzba wyróżniała się tym, że plonowała najwyżej w pierwszej rotacji zbioru, a dodatkowo w wariacie uprawy przy wzbogaceniu gleby ligniną, szczepionką mikoryzową i nawożeniem mineralnym (LFM) dała najwyższy całkowity plon biomasy ($134,59 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ s.m.}$) i ilość energii ($2176,95 \text{ GJ ha}^{-1}$) za okres 12 lat uprawy;
- wzbogacenie gleby wpłynęło korzystnie 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;
- gatunek SRWC w największym stopniu determinował wilgotność biomasy, zawartość popiołu, azotu, ciepło spalania i wartość opałową;
- z energetycznego punktu widzenia najbardziej korzystne właściwości miała robinia akacjowa, a najgorsze topola;
- wykazano możliwość i zasadność produkcji peletu z mieszaniny biomasy drzewnej pochodzenia leśnego oraz z plantacji SRWC, jednak jakość peletu z mieszaniny biomasy pogarszała się (głównie w odniesieniu do wzrostu zawartości popiołu, azotu, siarki czy chloru) wraz ze wzrostem udziału biomasy SRWC w stosunku do czystych trocin z drewna leśnego;
- spośród wszystkich wyprodukowanych 23 rodzajów peletu nie było żadnego, który nie spełniałby jakiegokolwiek klasy z analizowanych norm jakościowych dla peletów: ISO, PFI i KRFI, a wyniki badań mogą być podstawą do uwzględnienia biomasy SRWC w tworzeniu mieszanin z biomasą drzewną pochodzenia leśnego do produkcji peletu;
- najniższe koszty ($339,7 \text{ € Mg}^{-1}$) i nakłady energetyczne (1448 kWh Mg^{-1}) produkcji peletu stwierdzono w przypadku trocin sosny. Koszty produkcji peletu z topoli i wierzby były wyższe odpowiednio o 5-6%, a z robinii akacjowej o 8,5% w porównaniu do peletu sosnowego;
- wskaźnik efektywności energetycznej produkcji peletu z trocin sosny i brzozy (3,3–3,5) był wyższy niż w przypadku SRWC (ok. 2,2), jednak wykazano, że dodatek 25% biomasy SRWC do trocin umożliwił uzyskanie peletów, dla których wskaźnik efektywności energetycznej przekroczył wartość 3,0.


Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant sformułował 12 bardzo obszernych wniosków, których jedynym mankamentem jest nadmierna szczegółowość i brak uogólnień.

Przedstawiona do oceny dysertacja oparta na cyklu czterech monotematycznych publikacji pod wspólnym tytułem „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz wytwarzanie z niej peletu” jest bez wątpienia pionierska i wnosi nieznane dotychczas wartości poznawcze i utylitarne oraz charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem merytorycznym. Prace wchodzące w skład monotematycznego cyklu opublikowano w renomowanych czasopismach: *Industrial Crops and Products* (IF=6,449) i *Energies* (IF=3,252). **Dlatego wnoszę o jej wyróżnienie nagrodą.**

Wielką zaletą recenzowanej rozprawy jest jej przejrzysta struktura oraz syntetyczność i klarowność dowodowa. Jest to praca wielowątkowa, szeroko i starannie opracowana, a jej Autor wykazał umiejętności właściwego wnioskowania. Styl, poprawność, przejrzystość i zwięzłość oraz poziom edytorski nie budzi zastrzeżeń. Dysertacja dokumentuje kompetentny opis prowadzonych badań i uzyskanych wyników, ale również zawiera zalecenia dla producentów peletów. Recenzowana rozprawa eksponuje wszystkie istotne cechy warsztatu naukowego mgr Pawła Stachowicza w tym: właściwy dobór źródeł i dążenie do pełnego ich wykorzystania co potwierdza doskonałą znajomość problematyki objętej tematem i dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Pawła Stachowicza pt.: „Produkcja i pozyskanie biomasy lignocelulozowej oraz wytwarzanie z niej peletu” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami (tekst jednolity Dz. U. 2021, poz. 478). **Stawiam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, o dopuszczenie mgr Pawła Stachowicza do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

Wrocław, 12 czerwca 2023 roku


Prof. dr hab. dr h.c. multi Andrzej Kotecki