

Prof. dr hab. Barbara Kołodziej

Lublin, 3.11.2022 r.

Katedra Roślin Przemysłowych i Leczniczych

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dumitru Peni pt.:

„Biomass and biogas productivity from perennial herbaceous crops as an environmentally friendly source of energy”

1. Wprowadzenie

Niniejsza ocena została opracowana w odpowiedzi na pismo przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie prof. dr hab. Agnieszki Pszczółkowskiej z dnia 3 października 2022 roku. Przedłożona rozprawa doktorska została wykonana w Katedrze Genetyki, Hodowli Roślin i Inżynierii Biosurowców oraz Katedrze Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mariusz Jerzego Stolarskiego oraz prof. dr hab. inż. Marcina Dębowskiego w ramach Interdyscyplinarnego Programu Doktoranckiego „Biogospodarka” finansowanego przez Europejski Fundusz Społeczny nr POWR.03.03.00-00-M141/16.

2. Ocena problematyki badawczej

W ostatnich latach obserwowany jest gwałtowny wzrost potrzeb energetycznych. Światowe zużycie energii w końcu ubiegłego stulecia w stosunku do 1960 roku zwiększyło się niemal czterokrotnie, jednocześnie z wyczerpywaniem się złóż kopalin. Przeciwdziałać kryzysowi energetycznemu można m.in. zastępując paliwa kopalne energią odnawialną, przy czym największym potencjalnym źródłem energii w Polsce jest biomasa. Wzrost zainteresowania uprawą roślin energetycznych związany jest m.in. z Polityką Energetyczną Polski oraz Dyrektywą 2009/28/WE w sprawie promocji i wykorzystania energii z odnawialnych źródeł. Według wymagań zawartych w wyżej wymienionych strategicznych dla Polski dokumentach ogólny udział energii pozyskiwanej z OZE powinien wynosić 15% w roku 2020 i 20% w roku 2030. Ponadto dokumenty te zawierają zapisy między innymi dotyczące promocji roślin energetycznych, których biomasa może być przeznaczona do bezpośredniego spalania bądź produkcji biopaliw. Ten ostatni zapis wiąże się z koniecznością przeznaczenia na cele uprawy roślin energetycznych ok. 10% areалу krajowych gruntów ornych czyli 1,5 – 2,0 mln ha UR. Przy czym należy zwrócić uwagę, że ich uprawa nie może konkurować z gruntami ornymi, na których pozyskuje się żywność lub paszę dla zwierząt. Stąd zaleca się lokowanie plantacji na glebach słabej jakości lub marginalnych, gdzie jedną z opcji uzyskania zadowalających plonów staje się dodatkowe nawożenie. Jednocześnie uzyskanie wysokich, stabilnych plonów roślin lignocelulozowych jest możliwe przy zapewnieniu roślinom optymalnych warunków do wzrostu (w tym dostarczeniu dostatecznej ilości składników pokarmowych). Ponieważ nawożenie mineralne jest kosztowną i energochłonną operacją agrotechniczną, bada się możliwość zastąpienia go za pomocą produktów odpadowych (np. pofermentu).

Rozprawa doktorska mgr inż. Dumitru Peni pt. „Biomass and biogas productivity from perennial herbaceous crops as an environmentally friendly source of energy” dotyczy określenia optymalnych dawek nawożenia azotowego w postaci mineralnej (tj. saletry

amonowej) oraz pozostałości pofermentacyjnych na plony i jakość słonecznika wierzbolistego i różnika przerosłolistego jako surowców do produkcji biopaliw. Te pochodzące z Ameryki Północnej rośliny w ostatnim czasie stały się obiektem wielu badań w naszej strefie klimatycznej, nie tylko ze względu na wysoki potencjał plonowania ale też niewielkie wymagania i odporność na ekstremalne warunki klimatyczne m.in. mróz. Dodatkowo rośliny te są też źródłem substancji bioaktywnych do celów farmaceutycznych, weterynaryjnych lub kosmetycznych, a biomasa poekstrakcyjna słonecznika jest badana jako pasza wykorzystywana podczas hodowli owadów. Jak dotąd niewiele jest badań testujących możliwość wykorzystania biomasy ww. gatunków w procesie fermentacji beztlenowej, naturalnego procesu biologicznego, dzięki któremu organiczna biomasa/odpady mogą być przekształcane w biogaz na potrzeby energetyczne i pozostałości pofermentacyjne (które mogą być przetwarzane na nawóz ekologiczny). Obecnie w UE istnieje ok 20 tys. biogazowni w których wyprodukowano ponad 180 TWh. Najczęściej stosowanym w nich surowcem jest kukurydza, której uprawa prowadzi do wielu niekorzystnych następstw w środowisku. Dlatego też badania tego typu, dotyczące nowych roślin energetycznych z zerowym bilansem CO₂, wpisują się w promowaną obecnie w UE koncepcję gospodarki obiegu zamkniętego.

Badania przeprowadzono na istniejącej od 2013 roku plantacji słonecznika wierzbolistego oraz od 2017 roku - plantacji różnika i dotyczyły one trzech ostatnich lat trwania plantacji – 2019-2021 roku tj. od siódmego do dziewiątego roku wegetacji roślin *H. salicifolius* oraz od trzeciego do piątego roku wegetacji *S. perfoliatum*. W prezentowanej rozprawie doktorskiej przedstawiono także dokładną charakterystykę biomasy badanych roślin, co oceniam wysoko, gdyż umożliwia to wskazanie kierunków oraz metod jej wykorzystania, ewentualnych ograniczeń technologicznych, trudności eksploatacyjnych oraz problemów środowiskowych wynikających ze stosowania takiego materiału w energetyce. Zatem podjęta problematyka badań przez mgr inż. Dumitru Peni jest jednym z najważniejszych zadań stojących obecnie przed nauką, w zakresie uprawy nowych roślin energetycznych, wśród których poczytne miejsce zajmuje *H. salicifolius* oraz *S. perfoliatum*, w obszarze jakości biomasy i jej przydatności do produkcji biogazu, oraz obliczenia efektywności energetycznej oraz aspektu ekonomicznego tego typu działań.

3. Formalna analiza rozprawy

Prezentowana dysertacja składa się z czterech powiązanych tematycznie, anglojęzycznych prac opublikowanych w 2022 roku w znaczących czasopismach naukowych o łącznej liczbie punktów 680 wg punktacji MNiSW zgodnie z rokiem wydania (z sumarycznym IF wynoszącym 21,81), co jest zgodne z art. 187 pkt 3. ustawy (Dz. U. 2022 poz. 574 ze zm.). Artykuły stanowiące recenzowaną rozprawę są opracowaniami zbiorowymi (3 autorów), przy czym w trzech Doktorant jest pierwszym autorem. Deklarowany wkład pracy Doktoranta w opracowaniach współautorskich wynosi 40-60%, co pokrywa się z zakresem i udziałem prac przedstawionych w oświadczeniach zamieszczonych w załącznikach. Wkład Doktoranta w powstanie publikacji polegał m.in. na: opracowaniu koncepcji badań, opracowaniu metodyki, przeprowadzeniu analizy formalnej i badań, zebraniu wyników, walidacji, wizualizacji, pisania manuskryptu oraz poprawionego tekstu po recenzjach a także każdorazowo przeprowadzeniu procesu jako autor korespondujący.

Tym samym spełnia On jeden z warunków stawianych kandydatom na stopień doktora – opanowanie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (zgodnie z art. 187 pkt 1. ustawy (Dz. U. 2022 poz. 574 ze zm.))

Rozprawa obejmuje 31 stron maszynopisu w języku angielskim. Dołączone do niej zostały cztery oryginalne publikacje bazowe wraz z materiałami dodatkowymi zajmującymi 20 stron druku oraz trzy strony oświadczeń współautorów prac. Całość została podzielona na 10 głównych części, wyróżniając następujące rozdziały:

1.2. Streszczenie w języku angielskim oraz polskim - co jest zgodne z art. 187 pkt. 4 ustawy (Dz. U. 2022 poz. 574 ze zm.);

3. Spis publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej;
4. Półtorastronicowe wprowadzenie, zawierające syntetyczną charakterystykę problematyki poszczególnych prac wchodzących w skład rozprawy w języku angielskim;
5. Określenie celu badań;
6. Bogato ilustrowany rozdział: Materiał i metody podzielony na część polową i laboratoryjną, zakończony określeniem metodologii obliczeń statystycznych;
7. Wyniki i dyskusja;
8. Wnioski;

oraz nienumerowane: Podziękowania, zawierający 26 pozycji Spis literatury a także Prezentacja cyklu 4. prac wchodzących w monotematyczny cykl – tj.:

1. Green biomass quality of perennial herbaceous crops depending on the species, type and level of fertilization. *Industrial Crops and Products* 2022, 184, 115026. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115026> – praca nr 1 wraz z zamieszczonymi na 20 stronach maszynopisu Materiałami uzupełniającymi w formie tabelarycznej

2. *Helianthus salicifolius* as a new biomass source for biogas production. *Energies* 2022, 15, 2921. <https://doi.org/10.3390/en15082921> – praca nr 2

3. Influence of the fertilization method on the *Silphium perfoliatum* biomass composition and methane fermentation efficiency. *Energies* 2022, 15, 927. <https://doi.org/10.3390/en15030927> – praca nr 3

4. Biogas potential of cup plant and willow-leaf sunflower biomass. *Energy* 2022, 255, 124559; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124559> – praca nr 4

Bazę bibliograficzną rozprawy stanowią w przypadku pierwszej pracy – 53 pozycje, w drugiej – 62 pozycje, w trzeciej – 51 pozycji, zaś w pracy czwartej cyklu – 51 pozycji literaturowych, z których *gros* to pozycje anglojęzyczne, pod względem formalnym cytowane w sposób właściwy. Pozytywnie oceniam, że cytowana literatura pochodzi w większości z ostatnich dwóch dekad, jest ściśle związana z poruszonymi problemami badawczymi i stanowi doskonale kompendium wiedzy dla czytelnika.

Z formalnego punktu widzenia rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim.

4. Merytoryczna analiza pracy

Metodyka wykonanych prac jest prawidłowa, wyniki badań są szczegółowo analizowane i dyskutowane, zarówno na tle bieżącej literatury krajowej, jak i zagranicznej, stąd wartość zaprezentowanych w rozprawie publikacji w mojej ocenie jest wysoka. Doktorant wykazał się głęboką znajomością literatury, którą umiejętnie wykorzystał w czasie planowania doświadczeń, opisywania wyników i prowadzenia dyskusji. Dyskusje w przedstawionych publikacjach są bardzo dobrze napisane, czyta się je z przyjemnością. Są wyznacznikiem dojrzałości naukowej Pana mgr inż. Dumitru Peni. Podstawą wysokiej i pozytywnej oceny jest także poziom naukowy i potrzeba badań dotyczących zaleceń agrotechnicznych oraz efektywności produkcji biogazu z nowych roślin energetycznych. Badania tego typu mają ogromne znaczenie, zwłaszcza w ostatnim czasie, gdy na świecie w różnej skali i na różnych poziomach podejmowane są wysiłki zmierzające do rozwiązania problemów energetycznych przed jakimi staje ludzkość.

W tym kontekście podjęte przez mgr inż. Dumitru Peni badania nad słonecznikiem wierzbolistnym oraz różnikiem przerosłolistnym, stosunkowo mało poznanymi gatunkami o wysokim potencjale plonowania mają ogromne znaczenie, tak z naukowego, jak i poznawczego punktu widzenia.

Mimo to, w dostępnym piśmiennictwie brakuje publikacji na temat uszczegółowienia zasad ich uprawy oraz poznania czynników wpływających na poziom plonowania; niepełne są także informacje na temat charakterystyki energetycznej ich biomasy oraz możliwości przerobu, predestynujących zastosowanie w energetyce. Uzupełnieniem tej wiedzy poznawczo-praktycznej zajął się w swojej pracy doktorskiej mgr inż. Dumitru Peni

zakładając, że w naszym kraju możliwe jest wyprodukowanie wysokich plonów biomasy lignocelulozowej słonecznika wierzbolistnego i roznika przerosłolistego o dobrej wartości energetycznej i wysokiej przydatności do produkcji biogazu.

Artykuły opublikowano w bieżącym roku zaś doświadczenia polowe w stacji doświadczalnej UWM w Łęczanach prowadzono od 2013 do 2021 roku (przy czym zbiory biomasy badanych roślin energetycznych uwzględnione w dysertacji dotyczyły lat 2019 - 2021). Tak znaczący przedział czasowy świadczy, że Doktorant podjął się rozwiązania złożonego problemu opracowania technologii nawożenia, pozyskania i przetworzenia na biopaliwo biomasy lignocelulozowej z sylfium i słonecznika wierzbolistnego. Należy podkreślić, że uczynił to z przemyśleniem i wizją badawczo-praktyczną.

W części opisowej dysertacji Autor przedłożył krótki wstęp w którym wprowadza czytelnika w zagadnienia światowej energetyki i zmian klimatu i na tym tle zarysowuje znaczenie sylfium i słonecznika wierzbolistnego jako ważnych roślin energetycznych. W dalszej kolejności przedstawia 7 szczegółowych celów, które realizował podczas badań oraz skrótową metodykę przeprowadzonych badań. W części tej nie znalazłam właściwego określenia typu gleby, gdyż poza podanym w pracy nr 1 i 4 składem mechanicznym i informacją, że była to gleba klasy IV, nie znalazłam odnośnego opisu, co ważne w doświadczeniu nawozowym. Brak też informacji nt. zasobności i właściwości chemicznych gleby przed założeniem doświadczenia i na koniec prowadzenia eksperymentu polowego. Rozdział jest bogato ilustrowany, ułatwiając czytelnikowi poruszanie się w prezentowanej tematyce, zaś, jak pisze Autor, dokładne opisy używanych metodyk znajdują się w odpowiednich manuskryptach na których bazuje niniejsza rozprawa.

W kolejnej części: Wyniki i dyskusja Autor umiejętnie sprawozdaje uzyskane rezultaty, zamieszczając krótki opis i ilustrację warunków meteorologicznych oraz wybiórcze tabele i rysunki przeniesione i skrótowo opisane z publikacji bazowych, stanowiąc streszczenie szerszych badań opisanych w 4. artykułach na których praca doktorska została oparta. Autor starał się także odnieść do danych z literatury światowej.

W części opisowej znalazłam też niekonsekwencje w postaci umieszczonej na stronie 8. informacji, że badania prowadzono przez okres 4 lat, podczas gdy na stronie 10. i w treści manuskryptów bazowych napisano, że dotyczyły one dwóch lub trzech lat badań (2019-2021), zaś we wzorze na potencjalny dochód (str. 27) zamiast kropek umieszczono dwukropki ($0,1581$ – średnia cena sprzedaży energii elektrycznej (€ kWh^{-1}) i $0,38$ – wskaźniku efektywności wytwarzania energii elektrycznej).

Część opisowa kończy się wnioskami umieszczonymi na jednej stronie tekstu, dotyczącymi zarówno zmian charakterystyki termofizycznej i chemicznej biomasy obu gatunków pod wpływem zastosowanych czynników eksperymentalnych, jak i badania potencjału wykorzystania ich biomasy w produkcji biogazu oraz spisem 26 pozycji wykorzystywanej literatury. Przyznam, że mimo usiłowań Autora ta część dysertacji wg mojej oceny napisana została mniej ciekawie niż manuskrypty bazowe, stąd w dalszej ocenie oprę się na informacjach w nich zawartych.

Pierwsza praca z cyklu pt. „Green biomass quality of perennial herbaceous crops depending on the species, type and level of fertilization” przedstawia wyniki badań, których przedmiotem było zbadanie wpływu zróżnicowanego nawożenia mineralnego i organicznego (poferment z biogazowni) na właściwości termofizyczne oraz skład chemiczny biomasy *S. perfoliatum* i *H. salicifolius*. Badania potwierdziły, że zastosowanie nawożenia modyfikuje skład biomasy powodując m.in. zmniejszenie wilgotności, zawartości popiołu i ligniny, lecz zwiększenie wartości opałowej, zawartości węgla stałego i substancji lotnych oraz zawartości chloru, hemicelulozy i celulozy. Coroczne stosowanie największych dawek azotu w ilości 170 kg ha^{-1} nieznacznie podwyższało wilgotność zebranej biomasy wieloletnich roślin

energetycznych, jej wartość opałową oraz zawartość lotnych substancji, węgla, wodoru, siarki, azotu całkowitego, chloru, hemicelulozy i celulozy, co może mieć znaczenie w wyznaczeniu kierunku użytkowania biomasy. Przy czym stwierdzono, że zebrana wczesną jesienią biomasa *S. perfoliatum* zawierała niemal o 15% więcej wody niż pozyskana z *H. salicifolius*, który charakteryzował się większą wartością opałową (18,44 MJ kg⁻¹ s.m.) i zawartością węgla stałego (20,71% s.m.) oraz węgla całkowitego (46,23% s.m.), lecz niższą zawartością popiołu (szczególnie po aplikacji najwyższego poziomu nawożenia azotowego). W przypadku stosowania nawożenia mineralnego większą zawartość węgla, wodoru i siarki uzyskano dla *H. salicifolius*. Natomiast największą ilość hemicelulozy i substancji rozpuszczalnych w wodzie zimnej stwierdzono w biomacie *H. salicifolius*, zaś chloru, celulozy i ligniny u *S. perfoliatum*.

Zgodnie z logicznym ciągiem i konsekwencją prowadzonych badań i rozwiązywanych problemów badawczych w dwóch kolejnych opracowaniach Doktorant przeanalizował wpływ stosowanych agrotechnologii badanych wieloletnich gatunków roślin energetycznych na przydatność ich biomasy do produkcji biometanu i biogazu. Druga praca z cyklu zatytułowana „*Helianthus salicifolius* as a new biomass source for biogas production” dotyczy określenia przydatności biomasy tego gatunku jako substratu w biogazowniach. W manuskrypcie przeanalizowano skład zielonej biomasy i kiszonki z *H. salicifolius* w zależności od rodzaju i dawki nawożenia azotowego. Wykazano, że rodzaj nawożenia (organiczne, mineralne) istotnie modyfikował zawartość materii organicznej, suchej masy, popiołu, azotu oraz stosunek C/N, jednakże dawka nawożenia nie miała znaczącego wpływu na analizowane parametry. W przypadku stosowania kiszonki jako wsadu do komory fermentacyjnej notowano zmniejszenie zawartości suchej masy, zwiększenie zawartości C i N oraz zmiany stosunku C/N, wskazujące, że nie należy stosować biomasy słonecznika wierzbolistnego jako monosubstratu, lecz mieszać z substratami posiadającymi niski stosunek C/N. Wydajność produkcji biometanu mierzona przez 25 dni wynosiła od średnio od 169,4 NL kg⁻¹ VS dla surowej biomasy do 193,2 NL kg⁻¹ VS dla kiszonki. Zatem kiszenie zwiększa strawność wsadu do komory fermentacyjnej i ma pozytywny wpływ na stężenie CH₄, ale wydajność produkcji biometanu i biogazu w zależności od zastosowanego podczas produkcji biomasy na polu rodzaju nawożenia (organiczne lub mineralne) oraz jego dawki nie różniły się wyraźnie. Najwyższe tempo produkcji biogazu osiągnięto stosując kiszonkę z poletek nawożonych największymi dawkami nawożenia mineralnego, dużo słabsze zaś w przypadku surowej biomasy. W pracy zbadano także skład chemiczny pofermentu, który stosowany może być do nawożenia roślin uprawy polowej a w opisywanych eksperymentach stanowił jeden z obiektów doświadczalnych, spełniając koncepcję gospodarki obiegu zamkniętego.

W trzeciej pracy zatytułowanej „Influence of the fertilization method on the *Silphium perfoliatum* biomass composition and methane fermentation efficiency” Doktorant dokonał porównania efektywności produkcji biogazu z surowej i kiszonej biomasy sylfium otrzymywanego przy zastosowaniu, podobnych jak w przypadku słonecznika, różnych technologii uprawy (stosowania dwóch rodzajów nawożenia i dwóch jego dawek na tle obiektu kontrolnego). Zawartość suchej masy i materii organicznej oraz stosunek C/N były nieco mniejsze w kiszonce niż w surowej biomacie, natomiast zawartość popiołu, C, N nieco większe. Z kolei rodzaj nawożenia (organiczne/mineralne) wpłynął na zawartość materii organicznej, popiołu, suchej masy, N i stosunek C/N, zaś dawka azotu miała znaczący wpływ jedynie na zawartość azotu i stosunek C/N. Wydajność metanu i biogazu wynosiła średnio 222,82 i 361,18 NL kg⁻¹VS dla surowej biomasy, oraz 200,09 i 317,59 NL kg⁻¹ VS dla kiszonki. Produkcja metanu wynosiła od 193,59 do 243,61 NL CH₄kg⁻¹, przy czym najwyższy potencjał produkcyjny został osiągnięty dla biomasy z obiektu z aplikacją najwyższych dawek nawozów. Podobnie jak w przypadku słonecznika wierzbolistnego nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic w odniesieniu do produkcji biogazu i metanu pomiędzy rodzajem nawozu i dawką azotu. Najwyższe tempo produkcji biogazu osiągnięto stosując kiszonkę z poletek nawożonych największymi dawkami nawożenia mineralnego, dużo słabsze zaś w przypadku

surowej biomasy. Jeśli chodzi o wartość pofermentu, to zawartość suchej masy wynosiła średnio 6,7 do 6,9%, zaś zawartość C i N oraz ich stosunek był niższy od zalecanego (pomiędzy 15 a 20) i zawierał się w przedziale od 11,5 do 12,3 w przypadku kiszonki oraz od 12,1 do 12,8 w biomacie bez obróbki. Badania potwierdziły, że zastosowanie *S. perfoliatum* do produkcji biogazu jest bardzo obiecujące, ponieważ potencjał produkcji metanu jest podobny jak najczęściej u nas stosowanej kukurydzy.

W ostatniej pracy z cyklu pt. „Biogas potential of cup plant and willow-leaf sunflower biomass” Doktorant dokonał pewnego podsumowania wcześniej zamieszczonych badań i porównał plony biomasy, efektywność produkcji i potencjalne plony biogazu i biometanu, potencjalny plon energii z jednostki powierzchni i dokonał uproszczonej analizy ekonomicznej dla dwóch rodzajów biomasy (sylvium/słonecznik wierzbolistny) pozyskiwanej w ciągu trzech kolejnych lat uprawy, w zależności od rodzaju nawozu i dawki azotu. Tę część opracowania oceniam niezwykle wysoko, mimo iż pewnym mankamentem przedstawionych badań było porównywanie produktywności badanych roślin w różnym wieku. Średnie plony suchej masy *S. perfoliatum* ($8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$) były istotnie wyższe (o niemal 1/5) od zebranych w przypadku *H. salicifolius*. Zastosowanie pofermentu i mineralnego nawożenia azotowego spowodowało istotny wzrost plonowania sylvium w porównaniu z obiektem kontrolnym - odpowiednio o 61,9% i 128,6%. Poza tym stwierdzono, że zwiększenie dawki azotu z 85 do 170 kg ha^{-1} spowodowało zwiększenie plonów biomasy niemal o 1/3, szczególnie przy zastosowaniu nawożenia mineralnego. W przypadku trzy-, cztero- i pięcioletnich roślin różnika corocznie obserwowano zwiększenie plonów biomasy, natomiast u siedmio-, ośmio- i dziewięcioletnich roślin słonecznika obserwowano przeciwną tendencję, spowodowaną prawdopodobnie postępującą degeneracją roślin na plantacji. Biomasa *H. salicifolius* zawierała istotnie więcej organicznej suchej masy, szczególnie po zastosowaniu nawożenia organicznego i wysokich dawek azotu. Bardzo wysoko oceniam określenie taksonomicznej struktury bakterii beztlenowych, a także wskaźników obrazujących dynamikę transformacji beztlenowych - stężenia lotnych kwasów tłuszczowych (VFA) i współczynnika pojemności buforowej (FOS/TAC) w pozostałościach pofermentacyjnych. Średnia wydajność produkcji biogazu i biometanu z biomasy *S. perfoliatum* zebranej na początku września wyniosła $331,8 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ s.m.}$ (i była o 1/3 większa niż u *H. salicifolius*), szczególnie po corocznej aplikacji największych dawek azotu. Nawożenie nie miało jednak istotnego wpływu na wydajność biogazu lub metanu. Potencjalne plony biogazu, metanu i energii *S. perfoliatum* okazały się znacznie wyższe (o ponad połowę) niż w przypadku *H. salicifolius* a potencjalny przychód z produkcji energii był o niemal pięciokrotnie wyższy. Dlatego *S. perfoliatum* okazał się bardzo obiecującym gatunkiem jako źródła biomasy w biogazowniach.

Artykuły naukowe wchodzące w skład pracy doktorskiej nie budzą zastrzeżeń, a wyniki tych prac podlegały wcześniej ocenie przez wysokiej klasy specjalistów, recenzentów i wydawców. Z tego powodu nie czuję się zobowiązana, żeby dodatkowo je oceniać. Zadaję jedynie pytania, które są wynikiem mojej ciekawości naukowej:

1. Proszę wyjaśnić zmiany zachodzące podczas fermentacji beztlenowej substratu w postaci surowej biomasy słonecznika wierzbolistnego czy sylvium oraz wykonanej z niej kiszonki. Dlaczego w eksperymencie nie zaobserwowano istotnych różnic pod wpływem zastosowanych w doświadczeniu polowym czynników eksperymentalnych?

2. Jaką przyszłość widzi Pan dla analizowanych w toku badań gatunków roślin energetycznych w naszym kraju, lub szerzej w UE?

3. Charakteryzując warunki glebowe zarówno w artykule 1 i 4, jak i w rozdziale opisowym dysertacji poświęconym omówieniu badań podano, że pH (KCl) wynosiło 6,3%. Stad moje pytanie: w jakich jednostkach wyraża się i w jaki sposób określa się odczyn gleby? Jakie są metody jego wyrażania?

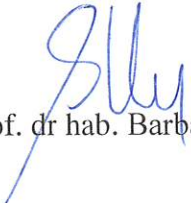
Podsumowując, były to wszechstronne badania mające zarówno aspekt poznawczy, jak i praktyczny, bowiem ich efekty można bezpośrednio wdrożyć w praktyce rolniczej. Po analizie tekstu rozprawy doktorskiej stwierdzam, iż Autor zaprezentował wysoki poziom wiedzy, umiejętność trafnego rozumowania oraz opracowania i prezentacji wyników badań. Jest to bardzo wartościowe studium naukowe wnoszące nowe informacje do poznania wpływu wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie i przydatność do procesu fermentacji beztlenowej biomasy różnika i słonecznika wierzbolistego. Należy także podkreślić umiejętność i swobodę korzystania z literatury naukowej i estetykę pracy. Zaznaczam w tym miejscu, że moje uwagi pojawiające się w tekście recenzji mają charakter dyskusyjny, nie obniżają wartości naukowej i merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę rangę uzyskanych wyników, poziom naukowy rozprawy doktorskiej, jak również dojrzałość naukową Doktoranta, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Dumitru Peni spełnia kryteria określone w art. 187 ust. 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2022 poz. 574 ze zm.). Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi dotyczącymi szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich, składam formalny wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Dumitru Peni do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie ze względu na kompleksowość i szeroki zakres badań nad efektywnością energetyczną dwóch gatunków wieloletnich roślin energetycznych zyskujących ostatnio coraz większe zainteresowanie badaczy, mający, co niezwykle ważne, zarówno aspekt ekonomiczny, jak i ekologiczny, wnoszę o wyróżnienie pracy stosowną nagrodą.

Lublin, 3.11.2022 r.


Prof. dr hab. Barbara Kołodziej

Review of the doctoral dissertation of Dumitru Peni M. Eng. entitled: „Biomass and biogas productivity from perennial herbaceous crops as an environmentally friendly source of energy”

1. Introduction

This evaluation was prepared in response to the letter of prof. dr. hab. Agnieszka Pszczółkowska, Chair of the Scientific Council of Agriculture and Horticulture of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, dated 3th October 2022. The submitted dissertation was carried out in the Department of Genetics, Plant Breeding and Bioresource Engineering and Department of Environmental Engineering at the University of Warmia and Mazury in Olsztyn under the supervision of prof. D.Sc., PhD., M.Eng. Mariusz Jerzy Stolarski and prof. D.Sc., PhD., M.Eng. Marcin Dębowski as part of the Interdisciplinary Doctoral Programme “Bioeconomy“ financed by the European Social Fund scheme No POWR.03.03.00-00-M141/16.

2. Evaluation of the research problem

Energy demand has risen rapidly in recent years. World energy consumption has almost quadrupled at the end of the last century compared to 1960, at the same time as natural resources have been depleted. One way to address the energy crisis is to replace fossil fuels with renewable energy, with biomass being the largest potential energy source in Poland. The growing interest in energy crops cultivation is inter alia linked to Poland’s Energy Policy and Directive 2009/28/EC on the promotion and use of energy from renewable sources. According to the above-mentioned strategy papers for Poland, the total share of renewable energy should be 15% in 2020 and 20% in 2030. In addition, those documents contain, inter alia, provisions on the promotion of energy crops, the biomass of which can be used for direct combustion or for the production of biofuels. The latter means that about 10% of the national arable land, i. e. 1.5-2.0 million hectares of agricultural land, must be used for energy crops. It should be noted that their cultivation cannot compete with arable land used for the production of food or animal feed. It is therefore advisable to plant crops on substandard or marginal soils, where additional fertilisation is one of the options for a satisfactory yield obtaining. At the same time, high, stable yields of lignocellulose plants can be achieved if the plants are given optimal growth conditions (including adequate nutrient intake). As mineral fertilisation is a cost-intensive and energy-intensive agrotechnical measure, it is being examined whether it can be replaced by waste products (e. g. fermentation residues).

Doctoral thesis of M.Eng. Dumtru Peni entitled „Biomass and biogas productivity from perennial herbaceous crops as an environmentally friendly source of energy” concerns the determination of optimal nitrogen fertilisers in mineral form (i. e. ammonium nitrate) and organic form (fermentation residues) on yield and quality of willow-leaf sunflower and cup plant as raw materials for the production of biofuels. These originated from North America plants have recently been the subject of numerous studies in our climate zone, not only due to their high yield potential, but also because of their low demands and their resistance to extreme climatic conditions such as frost. In addition, these plants also provide bioactive

substances for pharmaceutical, veterinary or cosmetic purposes, and the extracted biomass of the sunflower is tested as feed for insect breeding. So far, there have been few studies testing the use of the biomass of these species by anaerobic fermentation, a natural biological process involving organic biomass/waste in biogas for energy purposes and fermentation residues (which can be processed into biofertilizers). There are currently about 20,000 biogas plants in the EU with more than 180 TWh. The most commonly used raw material is maize, the cultivation of which has numerous negative effects on the environment. This type of research on new energy crops with zero carbon footprint is therefore in line with the circular economy currently promoted in the EU.

The studies were carried out on the willow-leaf sunflower plantation existing since 2013 and from 2017 on the cup plant plantation and covered the last three years of the plantation – 2019-2021, i. e. the seventh to ninth growing year of *H. salicifolius* and the third to fifth growing year of *S. perfoliatum*. The dissertation presented also a precise characterization of the biomass of the plants studied, which I appreciate very much because it allows us to show ways and methods of their use, possible technological limitations, operational problems and environmental problems that arise from the use of this material in the energy industry. The research problem addressed by M. Eng. Dumitru Peni is thus one of the most important challenges facing science in the field of the cultivation of new energy crops, including *H. salicifolius* and *S. perfoliatum*, the quality of biomass and its suitability for biogas production, and the calculation of energy efficiency, as well as the economic aspects of such activities.

3. Formal analysis of the doctoral dissertation

The present dissertation consists of four thematically related, English-language works published in 2022 in major scientific journals, with a total score of 680 points, that were evaluated according to the year of publication (with a combined IF of 21.81), which is in accordance with Article 187 paragraph 3 of the Act (Journal of Laws 2022 item 574 as amended). The articles that constitute a peer-reviewed dissertation are collective works with 3 authors, of which the doctoral candidate is the first author of three works. The stated contribution of the doctoral candidate's work to the co-author's work is 40-60%, which corresponds to the volume and proportion of the work included in the explanations in the appendices. The doctoral candidate's contribution to the creation of the publication included: conceptualization, curation of data, preparation of methodology, performing of formal analysis and investigation, resources, validation, visualisation, writing - original draft preparation, review and editing, conducting the process as a corresponding author and proofreading after reviews.

Thus, he fulfils one of the prerequisites for a doctoral degree: the ability to carry out scientific work independently (according to Art. 187 paragraph 1 of the Act (Journal of Laws 2022 item 574 as amended)).

The dissertation consist of 31 pages of transcripts in English. It was accompanied by four original basic publications with Supplementary data of 20 printed pages and three pages of statements by the co-authors. The whole is divided into 10 main parts, with the following chapters being highlighted:

- 1.2. Summary in English and Polish – in accordance with Article 187 paragraph 4 of the Act (Journal of Laws 2022 item 574 as amended);
3. List of publications making up the doctoral dissertation;
4. One and a half page of Introduction with a synthetic characterization of the problems of the individual works included in the dissertation, in English;
5. The aim of the study;

6. Richly illustrated section: Materials and methods, subdivided into field and laboratory experiments as well as define the methodology for statistical analysis;

7. Results and discussion;

8. Conclusions;

and not numbered: Acknowledgments, consisting of 26 articles References and presentation of the cycle 4 of the works entering the monothematic cycle – i. e.:

1. Green biomass quality of perennial her-baceous crops depending on the species, type and level of fertilization. *Industrial Crops and Products* 2022, 184, 115026. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115026> – manuscript no 1, together with the Supplementary data published on 20 typescript pages, in tabular form

2. *Helianthus salicifolius* as a new biomass source for biogas production. *Energies* 2022, 15, 2921. <https://doi.org/10.3390/en15082921>– manuscript no 2

3. Influence of the fertilization method on the *Silphium perfoliatum* biomass composition and methane fermentation efficiency. *Energies* 2022, 15, 927. <https://doi.org/10.3390/en15030927>– manuscript no 3

4. Biogas potential of cup plant and willow-leaf sunflower biomass. *Energy* 2022, 255, 124559; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124559>– manuscript no 4

The bibliographical basis of the dissertation consists of 53 items for the first work, 62 items for the second, 51 items for the third and 51 items for the fourth work. I find it positive that most of the cited literature comes from the past two decades, is closely linked to the research problems mentioned and is an excellent reference work for the reader.

From a formal point of view, the dissertation meets the requirements for a doctoral thesis.

4. Content analysis of the doctoral dissertation

The methodology of the work done is correct, the research results are analyzed and discussed in detail, both in the context of current domestic and foreign literature, therefore the value of the publications presented in the dissertation is high in my opinion. The PhD student showed a deep knowledge of literature, which he used skillfully in planning experiments, describing the results and discussing them. The discussions in the presented publications are very well written and are read with pleasure. They are an indicator of the scientific maturity of M. Eng. Dumitru Peni. The high and positive rating is also based on the scientific level and the need for research in terms of agricultural recommendations and the efficiency of biogas production from new energy crops. This type of research is of the utmost importance, especially in recent times, as efforts are being made at different levels and on different scales to solve mankind's energy problems.

In this context, the research of M. Eng. Dumitru Peni on the willow-leaf sunflower and cup plant, relatively unknown species with high yield potential, is of great importance, both from a scientific and cognitive point of view.

However, there is a lack of literature on the details of cultivating methods and the factors influencing yields. The energy efficiency of their biomass and the conversion capacities, which are predestined for use in the energy industry, are also incomplete. In addition to this cognitive-practical knowledge, Dumitru Peni's doctoral thesis dealt with the hypothesis that it is possible in our country to produce high yields of lignocellulose biomass of willow-leaf sunflower and cup plant with good energy value and high suitability for biogas production..

The articles were published in the current year and the field trials at the UWM research station in Łęzany were conducted from 2013 to 2021 (the biomass harvest of the energy crops studied, which were considered in the dissertation, covered the years 2019-2021). This significant time frame proves that the PhD student has taken on the complex problem of developing a technology for fertilizing, extracting and converting lignocellulose

biomass from cup plants and willow-leaved sunflowers into biofuel. It should be noted that he did so with a research and practice philosophy and a vision.

In the descriptive part of the dissertation, the Author presents a short Introduction in which he introduces the reader to global energy and climate protection issues and, against this background, outlines the importance of silphium and willow-leaved sunflowers as important energy plants. He then explains the 7 specific objectives he pursued during his studies, as well as a summary of the methodology of the studies carried out. In this part I did not find a correct description of the soil type, because apart from the mechanical composition given in manuscript 1 and 4 and the information that it was a class IVth soil, I could not find a description of soil characteristics what is important for the fertilization test. There is also no information on the nutrient content and chemical properties of the soil before the start of the experiment and at the end of the field test. The chapter is richly illustrated to make it easier for the reader to navigate the subject matter presented, and, as the Author writes, detailed descriptions of the methodologies used can be found in the corresponding manuscripts on which this dissertation is based.

In the next part: Results and discussion, the Author skilfully summarizes the results obtained by compiling a brief description and presentation of the weather conditions as well as selective tables and drawings from the basic publications that summarize the studies described in the four articles. He also tried to refer to data from world literature. I also found inconsistencies in the descriptive part, as on page 8 it was stated that the studies were carried out over a period of 4 years, while on page 10 and in the basic manuscripts of two or three years of study (2019-2021) and in the formula for potential yield (page 27) there were double points instead of points (0.1581 – average electric energy sale price € kWh⁻¹) and 0.38 for the electric energy production efficiency index). The descriptive section concludes with Conclusions on one page of the text, which refer both to the modification of the thermophysical and chemical properties of the biomass of both species by the experimental factors applied and to the investigation of the potential of their biomass for biogas production, as well as to a list of 26 articles of the References used. I admit that, despite the efforts of the Author, this part of the dissertation was, in my opinion, less interesting than the basic manuscripts, so I will base my further assessment on the information contained therein.

The first work of the cycle entitled „Green biomass quality of perennial herbaceous crops depending on the species, type and level of fertilization” presents the results of a study to investigate the effect of differentiated mineral and organic fertilisation (fermentation residues from biogas plants) on the thermophysical properties and chemical composition of the biomass of *S. perfoliatum* and *H. salicifolius*. Studies have confirmed that fertilisation changes the composition of biomass by reducing moisture content, ash and lignin content, but also increasing the higher heating value, the content of fixed carbon and volatile matter, and the content of chlorine, hemicellulose and cellulose. The annual use of the highest nitrogen doses of 170 kg ha⁻¹ slightly increased the moisture content of the collected biomass of perennial energy crops, the higher heating value and the content of volatile substances, carbon, hydrogen, sulphur, total nitrogen, chlorine, hemicellulose and cellulose, what is important to determine the direction of biomass use. The biomass of *S. perfoliatum* harvested in early autumn contained almost 15% more water than the biomass of *H. salicifolius*, which had a higher heating value (18.44 MJ kg⁻¹ d. m.) and a higher content of fixed carbon (20.71% d. m.) and total carbon (46.23% d. m.), but lower ash content

(especially after the application of the highest level of nitrogen fertilisation). Mineral fertilization has resulted in higher levels of carbon, hydrogen and sulphur for *H. salicifolius*. The largest proportion of hemicellulose and in cold water soluble substances was found in the biomass of *H. salicifolius* and in chlorine, cellulose and lignin of *S. perfoliatum*.

In accordance with the logical sequence and consequence of the research carried out and the research problems solved, the PhD student investigated in two consecutive studies the effect of the applied agrotechnology of the perennial energy plant species studied on the suitability of their biomass for the production of biomethane and biogas. The second work of the series entitled "Helianthus salicifolius as a new biomass source for biogas production" concerns the determination of the suitability of such biomass as a substrate in biogas plants. The manuscript analyses the composition of green biomass and silage with *H. salicifolius* depending on the type and dose of nitrogen fertilization. The type of fertiliser (organic, mineral) was shown to significantly changed the content of organic matter, dry matter, ash, nitrogen and C/N ratio, but the fertiliser dose did not have a significant effect on the parameters analysed. When silage was used as an input to the fermentation chamber, a reduction in the dry matter content, an increase in the C and N content and a change in the C/N ratio were observed, suggesting that the biomass of the willow-leaved sunflowers should not be used as a mono-substrate, but with mixture of substrates with low C/N ratio. The production capacity of 25 days averaged 169.4 NL kg⁻¹ VS for raw biomass to 193.2 NL kg⁻¹ VS for silage. The silage thus increases the digestibility of the fermentation material and has a positive effect on the CH₄ concentration, but the production capacity of biomethane and biogas did not differ significantly according to the biomass used from the fertiliser field (organic or mineral) and their dosage. The highest rate of biogas production was achieved by the use of silage from fields fertilized with the highest level of nitrogen, but much lower for raw biomass. The work also investigated the chemical composition of the fermentation residuous that can be used to fertilize crops, and in the experiments described, it was one of the test objects to fulfill the concept of the circular economy.

In the third work of the series entitled „Influence of the fertilization method on the *Silphium perfoliatum* biomass composition and methane fermentation efficiency" The PhD student compared the efficiency of biogas production from raw and silaged *S. perfoliatum* biomass, which is obtained with different cultivation technologies such as in the case of willow-leaved sunflowers (two types and two doses of fertilizers on the background of the control, unfertilized object). The dry matter and organic matter content as well as the C/N ratio were slightly lower in silage than in raw biomass, while the C, N and ash content was slightly higher. The type of fertilization (organic/mineral) influenced the content of organic matter, ash, dry matter, N and the C/N ratio, whereas the nitrogen dose significantly influenced only the nitrogen content and the C/N ratio. Methane and biogas yields averaged 222.82 and 361.18 NL kg⁻¹VS for raw biomass and 200.09 and 317.59 NL kg⁻¹VS for silage. Methane production ranged from 193.59 to 243.61 NL CH₄kg⁻¹, reaching the highest production potential for biomass from the plant with the highest fertilizer dose. As with the willow-leaf sunflower, no statistically significant differences in biogas and methane production were found out between the type of fertilizer compared and the nitrogen dose. The highest rate of biogas production has been achieved by using silage from fields with the highest mineral fertilisation dose, while the raw biomass is much weaker. As far as the fermentation residue is concerned, the C and N content averaged 6.7% to 6.9%, and their ratio

was below the recommended value (between 15 and 20), and was between 11.5 and 12.3 for silage and between 12.1 and 12.8 for untreated biomass. Studies have confirmed that the use of *S. perfoliatum* for biogas production is very promising, as the methane production potential is similar to the maize, most commonly used in our country.

In the last work of the cycle entitled „Biogas potential of cup plant and willow-leaf sunflower biomass” the doctoral candidate summarised the previously published studies and compared the yield of biomass, the efficiency of production and the potential yield of biogas and biomethane, the potential energy yield per unit area, and carried out a simplified economic analysis for two types of biomass (cup plant/willow-leaf sunflower) which have been grown in three consecutive years, depending on the type of fertiliser and the nitrogen dose. I appreciate this part of the study very much, although one drawback of the studies presented was to compare the productivity of the plants of different ages studied. The average dry mass yield of *S. perfoliatum* ($8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) was significantly higher (nearly by a fifth part) than that of *H. salicifolius*. The use of fermentation residues and mineral nitrogen fertilization resulted in a significant increase in cup plants yield of 61.9% and 128.6% compared to the control object. In addition, it was found out that increasing the nitrogen dose from 85 to 170 kg ha^{-1} resulted in an increase in biomass yields of almost one third, especially in mineral fertilization. Annual increases in biomass yields were observed for three-, four- and five-year-old cup plants, while the opposite trend was observed for seven-, eight- and nine-year-old willow-leaf sunflower plants, probably due to the progressive degeneration of plants on the plantation. The biomass of *H. salicifolius* contained a significantly higher proportion of organic dry matter, especially after organic fertilization and high nitrogen dosage. I appreciate the determination of the taxonomic structure of the anaerobic bacteria as well as indicators that represent the dynamics of the anaerobic transformation – concentration of volatile fatty acids (VFA) and buffer capacity factor (FOS/TAC) in fermentation residues. The average production capacity of biogas and biomethane from biomass of *S. perfoliatum* collected in early September was $331.8 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ d. m.}$ (and was one-third higher than *H. salicifolius*), especially after the highest annual application dose of nitrogen. However, fertilisation had no significant impact on biogas or methane yields. Potential yields of biogas, methane of *S. perfoliatum* were significantly higher (more than half) than those of *H. salicifolius* and the potential yield from energy generation was almost five times higher. Therefore, *S. perfoliatum* has shown promise as a biomass source in biogas plants.

The scientific articles of the dissertation are indisputable, and the results of this work have been evaluated beforehand by top-class experts, reviewers and publishers. For this reason, I do not feel obliged to evaluate them in addition. I only ask questions that are the result of my scientific curiosity:

1. Please explain the changes that occur during the anaerobic fermentation of the substrate in the form of raw biomass of sunflowers or cup plants and the resulting silage. Why were there no significant differences between the experimental factors used in the field experiment?
2. What future do you see for the energy plant species being studied in our country or more broadly, in the EU?
3. When describing the soil conditions, the pH value (KCl) in manuscripts 1 and 4 and in the descriptive chapter of the dissertation was shown as 6.3%. Hence my question: In which units is the soil reaction expressed and how is it determined? What are the methods of expressing it?

In summary, it was a comprehensive study, which had both a cognitive and a practical aspect, since its results could be directly translated into agricultural practice. After analyzing the text of the dissertation, I note that the Author has presented a high level of knowledge, the ability to reason correctly and the processing and presentation of research results. It is a very valuable scientific study that provides new insights into the influence of selected

agrotechnical factors on the harvest and the suitability of anaerobic fermentation of willow-leaf sunflower and cup plants. The ability and freedom to use scientific literature and the aesthetics of work should also be highlighted. At this point, I would like to point out that my comments in the text of the review are worthy of discussion and do not detract from the scientific and substantive value of the work, which I greatly appreciate.

5. Conclusion

Taking into account the relevance of the results obtained, the scientific level of the dissertation and the scientific maturity of the doctoral candidate, I note that the dissertation submitted for review by M.Eng. Dumitru Peni meets the criteria of Article 187 of the Law of 20 July 2018 Law on Higher Education and Science (Journal of Laws 2022 item 574 with amendments). In accordance with the applicable legislation on the detailed procedure for carrying out doctoral activities, I submit a formal application to the Scientific Council of the Discipline of Agriculture and Horticulture of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn for the acceptance and admission of M. Eng. Dumitru Peni to the further steps of PhD supervisor.

At the same time, in view of the complexity and breadth of research into the energy efficiency of two perennial energy plant species, which have recently found increasing scientific interest, having both important economic and ecological aspects, I call for work to be rewarded with a reasonable price.

Lublin, 3th November 2022


Prof. dr hab. Barbara Kołodziej