

Załącznik 2

AUTOREFERAT

dr inż. Michał Zenon Krzyżaniak
Katedra Hodowli Roślin i Nasiennictwa
Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Olsztyn, 2019

1. **Imię i Nazwisko:** Michał Zenon Krzyżaniak

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

- 2012 – doktor nauk rolniczych w zakresie agronomii, specjalność agroenergetyka. Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Rozprawa doktorska pod tytułem „Produkcyjność oraz ocena cyklu życia (Life Cycle Assessment) wierzby uprawianej na cele energetyczne”.
- 2009 – magister energii odnawialnej w zakresie biopaliw i bioenergii. The School for Renewable Energy Science/University of Iceland/University of Akureyri – Islandia. Praca magisterska pod tytułem „Feasibility study of CHiP plants in the European Union using pure plant oils”.
- 2005 – magister inżynier ochrony środowiska w zakresie kształtowanie i ochrona środowiska. Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Praca magisterska pod tytułem “Czynniki kształtujące morfologię koryta rzeki pojeziernej na przykładzie górnego i środkowego biegu rzeki Łyny”.

3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.**

2009-2012 – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie – technolog w Katedrze Hodowli Roślin i Nasiennictwa

Od 2012 (nadal) - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie – adiunkt w Katedrze Hodowli Roślin i Nasiennictwa

4. **Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):**

a) **tytuł osiągnięcia naukowego:**

„Produkcyjne i środowiskowe aspekty pozyskania biomasy lignocelulozowej z roślin wieloletnich”

b) **Wykaz publikacji wchodzący w skład osiągnięcia naukowego:**

- P1. **Krzyżaniak M.**, Stolarski M.J., Waliszewska B., Tworkowski J., Szczukowski S., Załuski D., Śnieg M. 2014. Willow biomass as feedstock for an integrated multi-product biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 58: 230-237, **pkt. MNSiW 40, IF 2,837.**

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współpracowaniu koncepcji i zakresu badań doświadczalnych, przygotowaniu materiału do badań i wykonywaniu badań, analizie i interpretacji wyników badań,

przeprowadzeniu dyskusji, sformułowaniu wniosków, napisaniu wstępnej wersji pracy, naniesieniu poprawek zgodnie z uwagami recenzentów. Byłem autorem korespondencyjnym. Mój udział szacuję na 50%.

P2. Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Bieniek A., Mleczek M. 2015. Willow biomass obtained from different soils as a feedstock for energy. Industrial Crops and Products, 75: 114-121, pkt. MNSiW 40, IF 3,449.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współopracowaniu koncepcji i zakresu badań doświadczalnych, przygotowaniu materiału do badań i wykonywaniu badań, interpretacji wyników badań, napisaniu wstępnej wersji pracy, przeprowadzeniu dyskusji, sformułowaniu wniosków, naniesieniu poprawek zgodnie z uwagami recenzentów. Byłem autorem korespondencyjnym. Mój udział szacuję na 50%.

P3. 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 Research, 8: 1136-1147, pkt. MNSiW 35, IF 3,309.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współopracowaniu koncepcji i zakresu badań doświadczalnych, przygotowaniu materiału do badań, wykonywaniu analiz i badań, analizie wyników badań, przygotowaniu wstępu pracy i dyskusji wyników. Mój udział szacuję na 40%.

P4. 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. Industrial Crops and Products, 107: 244-259, pkt. MNSiW 40, IF 3,849.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współopracowaniu koncepcji i zakresu badań doświadczalnych, przygotowaniu materiału do badań i wykonywaniu badań, analizie wyników badań, współopracowaniu wstępu i dyskusji wyników. Mój udział szacuję na 40%.

P5. Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J. 2016. Life cycle assessment of new willow cultivars grown as feedstock for integrated biorefineries. BioEnergy Research, 9: 224-238, pkt. MNSiW 35, IF 2,487.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji i zakresu badań, opracowywaniu analizy oceny cyklu życia, analizie i interpretacji wyników badań, napisaniu wstępnej i końcowej wersji pracy, przeprowadzeniu dyskusji, sformułowaniu wniosków, naniesieniu poprawek zgodnie z uwagami recenzentów. Byłem autorem korespondencyjnym. Mój udział szacuję na 75%.

P6. Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Warmiński K. 2018. Life cycle assessment of Virginia mallow production with different fertilisation options. Journal of Cleaner Production 177: 824–836, pkt. MNSiW 40, IF 5,651.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji i zakresu badań, opracowywaniu analizy oceny cyklu życia, analizie i interpretacji wyników badań, napisaniu wstępnej i końcowej wersji pracy, przeprowadzeniu dyskusji, sformułowaniu wniosków, naniesieniu poprawek zgodnie z uwagami recenzentów. Byłem autorem korespondencyjnym. Mój udział szacuję na 70%.

P7. Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Warmiński K. 2019. Life cycle assessment of poplar production: Environmental impact of different soil enrichment methods. Journal of Cleaner Production 206: 785–796, pkt. MNSiW 40, IF 5,651.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji i zakresu badań, opracowywaniu analizy oceny cyklu życia, analizie i interpretacji wyników badań, napisaniu wstępnej i końcowej wersji pracy, przeprowadzeniu dyskusji, sformułowaniu wniosków, naniesieniu poprawek zgodnie z uwagami recenzentów. Byłem autorem korespondencyjnym. Mój udział szacuję na 70%.

Sumaryczny IF z roku opublikowania = 27,233

Suma punktów MNiSW = 270

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

Wstęp

Biomasa lignocelulozowa ma olbrzymi potencjał wykorzystania na cele przemysłowe i energetyczne, w różnych ścieżkach konwersji (termochemicznej, chemicznej czy biochemicznej). Z lignocelulozy można otrzymać wiele cennych związków służących do wyrobu różnego rodzaju produktów wykorzystywanych m.in. w transporcie, przemyśle tekstylnym, spożywczym, opakowaniowym, kosmetycznym, spożywczym, budownictwie i rekreacji, czy na cele energetyczne (DOE 2004, Zhang i in. 2011). Można ją pozyskiwać z zasobów leśnych, rolniczych, jak również z pozostałości i odpadów. Wsadem dla instalacji przetwarzających biomasę mogą być również wieloletnie rośliny lignocelulozowe: trawy (np. miskant olbrzymi, miskant cukrowy, spartina preriowa), drzewa i krzewy szybko rosnące (short rotation woody crops – SRWC) (np. wierzba, topola, robinia akacja) czy byliny (np. topinambur, ślaziołek pensylwański, słonecznik wierzbolistny) (Baldini i in. 2004, García i in. 2014, Kajaste 2014, Stolarski i in. 2011a). Plantacje gatunków wieloletnich roślin lignocelulozowych powinny być zakładane na glebach słabej jakości, które są mniej przydatne lub w ogóle nie nadają się pod uprawę roślin konsumpcyjnych czy paszowych. Chodzi przede wszystkim o to aby występowała jak najmniejsza konkurencja pomiędzy roślinami do produkcji żywności oraz tymi przeznaczonymi na cele energetyczne czy przemysłowe. Tym nie mniej wiadomo, że w przypadku komercyjnej produkcji biomasy plantator będzie zainteresowany uzyskaniem jak najwyższego plonu z jednostki powierzchni. Z szeregu badań wynika, że na plon biomasy roślin lignocelulozowych wpływa wiele czynników, które są ze sobą w istotny sposób powiązane. W kolejności należałoby wskazać na dobór odpowiedniego gatunku i odmiany. Bardzo ważny i kluczowy czynnik to warunki glebowe, a ponadto warunki klimatyczne, nawożenie, zabiegi agrotechniczne oraz gęstość sadzenia i częstotliwość zbioru (Clifton-Brown i Lewandowski 2002, Nabel i in. 2014, Serapiglia i in. 2012, Stolarski i in. 2011b).

Aby uzyskać racjonalny ekonomicznie i technicznie plon biomasy, rośliny uprawne (jak również wieloletnie rośliny lignocelulozowe) powinny być nawożone lub gleby gorszej jakości mogą być odpowiednio wzbogacone. Powyższe zabiegi są kosztowne, a ich wykorzystanie w uprawach wieloletnich roślin energetycznych nie zawsze przynosi pożądany skutek. Szuka się więc

alternatywnych technologii produkcji z wykorzystaniem pozostałości poprodukcyjnych i rolniczych np. lignina, osady ściekowe, obornik i gnojowica, kompost, biowęgiel i inne. Powyższe substancje, przygotowane jako nawozy lub preparaty poprawiające żyzność gleb mają tą zaletę, że oprócz dostarczania składników pokarmowych roślinom, zwiększają żyzność gleby oraz wiążą w glebie węgiel organiczny (Buss i in. 2016, Dahlin i in. 2017, Lafleur i in. 2012, Lindvall i in. 2012, Moreno i in. 2017). Dlatego też prowadzi się badania nad wykorzystaniem alternatywnych sposobów nawożenia i wzbogacania gleby na plantacjach wieloletnich roślin lignocelulozowych.

W niektórych krajach świata i w Unii Europejskiej prawnie wspomaga się (lub wspomagało) wykorzystanie biomasy pochodzącej z pozostałości rolniczych oraz biomasy pozyskiwanej z wieloletnich plantacji roślin lignocelulozowych. Produkowana biomasa, a następnie pozyskane z niej bioprodukty powinny spełniać wymogi stawiane odnawialnym źródłom i być produkowanymi w sposób zrównoważony (Komisja Europejska 2018). Narzędziem umożliwiającym zbadanie lub porównanie oddziaływania wykorzystania biomasy roślin na cele przemysłowe i energetyczne (lub jakiegokolwiek dowolnego produktu) jest znormalizowana metoda – ocena cyklu życia (z ang. Life Cycle Assessment - LCA). Jedną z najważniejszych zalet LCA jest możliwość określenia emisji gazów cieplarnianych oraz innych ważnych efektów środowiskowych np. eutrofizacji czy zakwaszenia, dla produkcji biomasy przeznaczonej na bioenergię i bioprodukty (Bacenetti i in. 2012, Borzecka-Walker i in. 2011, Felten i in. 2013, González-García i in. 2012). Ponadto dzięki LCA możliwe jest określenie „słabych ogniw”, znacznie oddziałujących na środowisko w technologii produkcji wieloletnich roślin lignocelulozowych.

Cel badań

Celem badań stanowiących osiągnięcie naukowe była ocena wpływu wybranych gatunków wieloletnich roślin lignocelulozowych oraz różnych sposobów ich nawożenia na plon biomasy i jej cechy jakościowe, a także określenie oddziaływania technologii produkcji biomasy na środowisko. Badania te koncentrowały się wokół poniższych celów szczegółowych:

1. Wpływ odmian i klonów wierzby na plon i jakość biomasy w warunkach uprawy komercyjnej.
2. Wpływ różnych sposobów wzbogacania gleby na plon i jego wartość energetyczną gatunków uprawianych w systemie SRWC.
3. Wpływ nawożenia mineralnego i organicznego na plon biomasy wieloletnich roślin lignocelulozowych z grup traw i bylin.
4. Analiza produkcji biomasy różnych odmian wierzby w uprawie komercyjnej za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych.
5. Analiza wpływu różnych metod wzbogacania gleby na produkcję ślazuwca pensylwańskiego za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych.

6. Analiza wpływu różnych sposobów nawożenia na produkcję topoli za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych.

Cel 1. Wpływ odmian i klonów wierzby na plon i jakość biomasy w warunkach uprawy komercyjnej

Badania na plantacjach komercyjnych prowadzono na gruntach Stacji Dydaktyczno-Badawczej (SDB) w Łęczanach należącej do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM). W pierwszym doświadczeniu, na plantacji komercyjnej (P1), badano potencjał plonowania oraz jakość biomasy siedmiu odmian/klonów wierzby: *Salix viminalis* odmiana Start, Tur, Turbo (zarejestrowanych w latach 2007-2009), oraz nowych klonów UWM 006 (obecnie odmiana Żubr), UWM 043 (obecnie odmiana Ekotur), UWM 035 *Salix pentandra*, UWM 155 *Salix dasyclados*. Plantację założono na glebie o niskiej jakości, wytworzonej z piasku słabogliniastego. Powierzchnia plantacji wynosiła ok. 10,5 ha. Zręzy wysadzone były w kwietniu 2010 r, w gęstości 18 000 szt. ha⁻¹. Uprawę wierzby zaplanowano w cyklu trzyletnim, najczęściej stosowanym w komercyjnej produkcji tego rodzaju, i jej zbioru dokonano w grudniu 2012 r. W drugim doświadczeniu prowadzonym również na plantacji wielkoobszarowej (P2) badano produktywność i jakość biomasy wierzby *Salix viminalis*, odmiana Turbo i klon UWM 043 (obecnie odmiana Ekotur). Plantacja była założona na dwóch stanowiskach glebowych: glebie lekkiej piaszczystej i ciężkiej glebie gliniastej. Gęstość sadzenia roślin wynosiła również 18 000 szt. ha⁻¹. Planacje założono w kwietniu 2008 r. na powierzchni 4,70 ha. Plon biomasy określono również dla rotacji trzyletniej 2009-2011, zbiór roślin wykonano w styczniu 2012 r.

W pierwszym trzyletnim cyklu zbioru plon biomasy dla 7 odmian wierzby wyniósł średnio 7,25 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. (P1). Był on istotnie najwyższy u odmiany Żubr (14,23 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Wysoki, choć istotnie niższy plon określono u odmiany Ekotur (11,50 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.), a istotnie najniższy plon biomasy dała UWM 155 (2,79 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Natomiast w drugim doświadczeniu (P2), plon biomasy wierzby był najwyższy u odmiany Ekotur (średnio 9,70 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Na glebie lekkiej był on jednak niski i wynosił tylko 3,28 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., natomiast na glebie ciężkiej wyniósł on aż 16,12 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Odmiana Turbo plonowała niżej średnio o 40,4%. Na glebie lekkiej dała plon 2,91 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., a na lepszym stanowisku glebowym 11,29 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.

Z przeprowadzonych badań wynika, że średni plon wierzby uprawianej w warunkach komercyjnych, w trzyletnim cyklu zbioru, wyniósł średnio 7,8 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Należy więc stwierdzić, że był on niższy w porównaniu do tych maksymalnych uzyskiwanych w ścisłych doświadczeniach polowych, gdzie w optymalnych warunkach plony dochodziły nawet do 30 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. (Stolarski i in. 2008, Szczukowski i in. 2005), a średnio mieściły się zwykle w przedziale od 10 do 12 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. (Tworkowski i in. 2006). Jednakże należy podkreślić, że nowe odmiany wierzby Żubr i Ekotur w produkcji komercyjnej plonowały na wysokim zadawalającym poziomie

(maksymalnie do 16 Mg ha⁻¹·rok⁻¹ s.m.), wyższym od starszych odmian. Wskazuje to na bardzo duę znaczenie doboru odmiany wierzby do produkcji komercyjnej jak i również istotny wpływ warunków glebowych.

W badaniach analizowano również cechy termofizyczne i skład chemiczny biomasy różnych odmian wierzby m. in. wilgotność biomasy, ciepło spalania, wartość opałowa, skład elementarny, zawartość ligniny, holocelulozy i celulozy (P1). Zawartość celulozy dla wszystkich badanych odmian wynosiła średnio 44,37% s.m. Najwyższą zawartość celulozy oznaczono w biomacie odmiany Ekotur (47,64% s.m.). Nieznacznie, choć istotnie niższą zawartość tej cechy określono dla odmian Turbo i Źubr (odpowiednio 44,89 i 45,31% s.m.). Dlatego też wysokie plony biomasy odmian Źubr i Ekotur skutkowały wysokimi potencjalnymi plonami celulozy wynoszącymi odpowiednio 6,45 i 5,48 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Pomimo wysokiej zawartości celulozy w odmianie Turbo jej potencjalny plon celulozy znalazł się dopiero w trzeciej grupie jednorodnej (3,04 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.) Najniższym plonem zarówno biomasy (2,79 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.) jak i celulozy charakteryzował się klon UWM 155 (1,20 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Powyższe wyniki są bardzo istotnego z punktu widzenia potencjalnego wykorzystania tego rodzaju biomasy lignocelulozowej np. w zintegrowanych biorafinacjach czy przemyśle papierniczym.

Znaczne zróżnicowanie wykazano także przy określeniu wartości opałowej biomasy badanych odmian i klonów. W doświadczeniu opisanym w pracy P1 wartość tej cechy wynosiła średnio 8,38 MJ kg⁻¹; najwyższa była u odmiany Tur (9,16 MJ kg⁻¹). W drugiej grupie jednorodnej znalazła się UWM 035. Pozostałe klony i odmiany tworzyły trzy grupy jednorodne z wartością opałową w przedziale 7,77-8,42 MJ kg⁻¹, odpowiednio dla UWM 155 i Źubr. Natomiast w drugim doświadczeniu (opisanym w pracy P2) wartość opałowa wynosiła średnio 8,75 MJ kg⁻¹. Nowa odmiana Ekotur posiadała istotnie wyższą wartość opałową (średnio 8,98 MJ kg⁻¹) w porównaniu do Turbo (8,52 MJ kg⁻¹). Dlatego też wysoki plony biomasy uzyskane na glebie ciężkiej oraz jej wysoka wartość opałowa skutkowały wyższym plonem energii nowej odmiany Ekotur (277 GJ ha⁻¹ rok⁻¹) niż dla odmiany Turbo (192 GJ ha⁻¹ rok⁻¹).

Cel 2. Wpływ różnych sposobów wzbogacania gleby na plon i jego wartość energetyczną gatunków uprawianych w systemie SRWC.

Do realizacji tego celu badawczego wytypowano stosunkowo słabe stanowisko glebowe, tak aby w tych warunkach ocenić potencjał plonowania badanych gatunków uprawianych w systemie SRWC, w zależności od zastosowanego sposobu wzbogacania gleby (P2). Doświadczenie zlokalizowano na glebie rdzawej właściwej wytworzonej z piasku luźnego. Podstawą prezentowanych badań było dwuczynnikowe ścisłe doświadczenie założone w kwietniu 2010 r. Pierwszym czynnikiem doświadczenia były 3 gatunki roślin: wierzba (*Salix viminalis*, klon UWM 006, obecnie odmiana Źubr);

topola (*Populus nigra* x *P. Maximowiczii* Henry cv. Max-5); robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia*). Czynnikiem drugim był sposób wzbogacenia gleby: 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) oraz obiekt kontrolny bez żadnego wzbogacania gleby (C). Doświadczenie założono w zagęszczeniu 11 110 szt. ha⁻¹, w trzech powtórzeniach. Po zakończeniu czwartego okresu wegetacji, w grudniu 2013 r. określono plon roślin i pobrano próby do analiz laboratoryjnych w celu określenia wartości energetycznej plonu i cech jakościowych biomasy.

Stwierdzono, że plonowanie roślin było istotnie różnicowane poprzez gatunki i sposób wzbogacenia gleby oraz w obrębie interakcji pomiędzy tymi czynnikami doświadczenia. W przeliczeniu na rok użytkowania plantacji istotnie najwyższy plon biomasy dała wierzba, średnio 8,34 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Topola plonowała na tym samym poziomie, średnio 8,21 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., natomiast plon biomasy robinii wynosił tylko 2,87 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Analizując zastosowane sposoby wzbogacenia gleby stwierdzono, że topola najwyższej plonowała w obiekcie w którym zastosowano łącznie ligninę i nawożenie mineralne – LF (10,49 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Plon topoli z obiektu LMF był o 10,9% niższy. W kolejnej grupie jednorodnej u tego gatunku znalazły się rośliny uprawiane w obiektach F, L oraz MF. Plony w tych wariantach były odpowiednio o 12,2, 12,7 i 18,9% niższe w porównaniu do najwyższego plonu uzyskanego u topoli. Natomiast w obiektach M i C plony te były niższe, odpowiednio o 39,2 i 47,8%. Natomiast wierzba najwyższej plonowała w obiekcie LMF (10,3 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Statystycznie tak samo plonowała wierzba z obiektu LF. W obiekcie L plon wierzby był o 9,5% niższy od najwyższego plonu u tego gatunku. W innych kombinacjach zaliczonych do grupy jednorodnej „b” plon wierzby był niższy w zakresie 11,8-17,0%. Natomiast istotnie najniższe plony wierzby uzyskano w obiektach C i M. Z kolei robinia akacjowa najwyższej plonowała w obiekcie LF (5,40 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Jednakże plon ten był o 48,5% niższy niż u najwyższego plonu u topoli. Z drugiej strony był on ponad 3-krotnie wyższy niż w obiekcie C dla robinii akacjowej.

Spośród zastosowanych sposobów wzbogacenia gleby istotnie najwyższy średni plon biomasy, dla trzech badanych gatunków SRWC, uzyskano w obiektach, w którym łącznie zastosowano ligninę i nawożenie mineralne – LF (8,57 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Był on ponad 2-krotnie wyższy w porównaniu do średniego plonu uzyskanego w obiektach C. W przejściowej grupie jednorodnej pod względem wysokości średniego plonu suchej biomasy znalazł się obiekt LMF, a w kolejnej obiekty L i F. W jednej grupie jednorodnej w zakresie wartości tej cechy znalazły się obiekty MF i LM. Natomiast zastosowanie samej mikoryzy zwiększyło średnie plonowanie gatunków o 20,2% w porównaniu do kontroli.

Najwyższą wartość energetyczną plonu uzyskano u wierzby (średnio 142,1 GJ ha⁻¹ rok⁻¹). Wartość tej cechy u topoli znajdowała się w tej samej grupie jednorodnej, chociaż była o 2,7% niższa

niż u wierzby. Natomiast wartość energetyczna biomasy robinii akacjowej była aż o 64,5% niższa w porównaniu do wierzby. W całym eksperymencie najwyższą wartość energetyczną plonu ($176,7 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$) określono u topoli uprawianej w obiekcie LF. W pozostałych kombinacjach, w których uprawiano topolę wartość tej cechy była niższa o 11-48%. Wartość energetyczna plonu wierzby zawierała się w przedziale $87,4\text{-}175,1 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$. Natomiast u robinii akacjowej wartość tej cechy była najniższa i zawierała się przedziale $28,6\text{-}94,8 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$.

Cel 3. Wpływ nawożenia mineralnego i organicznego na plon biomasy wieloletnich roślin lignocelulozowych z grup traw i bylin

W ramach realizacji tego celu badawczego założono czteroczynnikowe ścisłe doświadczenie polowe, w maju 2013 roku (P4). Pierwszym czynnikiem doświadczenia były cztery gatunki roślin: topinambur (*Helianthus tuberosus* L.), ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby L.), słonecznik wierzbolistny (*Helianthus salicifolius* A. Dietr), miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus* J.M.Greef & M.Deuter). Drugim czynnikiem doświadczenia były formy nawożenia: poferment z biogazowni rolniczej mokry (WD), suszony (DD), toryfikowany (TD), nawożenie mineralne (MF) i kontrola (brak nawożenia (C)). Na podstawie zawartości podstawowych składników pokarmowych w poszczególnych nawozach wyliczono ich dawki aby zbilansować nawożenie azotem na dwóch poziomach: 85 i 170 kg ha^{-1} (np. WD 85 , TD 170). Powyższe dawki były trzecim czynnikiem doświadczenia. Czwartym czynnikiem doświadczenia były trzy kolejne cykle zbioru roślin, prowadzone w latach: 2013-2015.

Bulwy topinamburu i kłącza ślazowca pensylwańskiego wysadzono w zagęszczeniu $20\ 000$ sztuk ha^{-1} . Natomiast kłącza miskanta olbrzymiego i zielne sadzonki słonecznika wierzbolistnego wysadzono w zagęszczeniu 10 tys. sztuk ha^{-1} . Całe doświadczenie zostało założone w trzech powtórzeniach. W celu określenia plonu biomasy nadziemnej ścinano wszystkie rośliny z poszczególnych poletek, w październiku i listopadzie lat 2013-2015. Pozyskane z każdego poletka rośliny ważono wagą elektroniczną, określając tym samym plon świeżej biomasy z danego obiektu i przeliczano go na powierzchnię 1 ha . W trakcie zbioru roślin z poszczególnych poletek pobierano reprezentatywne próby biomasy do oznaczenia wilgotności biomasy, w celu określenia plonu suchej biomasy roślin.

Plon biomasy był istotnie różnicowany przez wszystkie główne czynniki doświadczenia oraz większość interakcji pomiędzy nimi. Spośród badanych gatunków istotnie najwyżej plonował słonecznik wierzbolistny, średnio ponad $9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ s.m. Pozostałe gatunki plonowały niżej o 34%, 54% i 64%, odpowiednio topinambur, ślazowiec pensylwański i miskant olbrzymi. Nawożenie oraz wzrost dawki azotu generalnie wpływały na wzrost plonowania roślin w porównaniu do obiektu kontrolnego. Średni plon biomasy 4 gatunków wzrastał w kolejnych latach wegetacji roślin. Jednakże

nie wszystkie gatunki reagowały w taki sam sposób na wymienione wyżej czynniki. W przypadku słonecznika wierzbolistego najniższe plony uzyskano w pierwszym roku, a zdecydowanie najwyższe (ok. 15 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.) w trzecim roku uprawy, w obiektach z nawożeniem mineralnym (MF), pofermentem suchym (DD) oraz w obiekcie kontrolnym (C). Gatunek ten wysoko plonował również w drugim roku uprawy (8,5-13,2 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Również u miskanta olbrzymiego i ślazuwca pensylwańskiego następował wzrost plonowania w kolejnych latach uprawy, jednakże uzyskiwane plony były zdecydowanie niższe. W pierwszym roku uprawy ślazuwiec plonował w zakresie 0,8-2,8 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., a plony miskanta oscylowały w granicach 1 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., niezależnie od zastosowanego rodzaju i poziomu nawożenia. W drugim roku uprawy plony tego gatunku zawierały się w przedziale 2,9-4,5 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., a w trzecim w granicach 7 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m., przy zastosowaniu nawożenia mineralnego w dawce 170 kg ha⁻¹ oraz w obiekcie kontrolnym. W pozostałych obiektach, w których stosowano nawożenie pofermentem stwierdzono niższe plony. Dodatkowo w porównaniu do drugiego roku uprawy stwierdzono spadek plonowania miskanta w obiektach, w których stosowano poferment mokry. Plony biomasy ślazuwca w drugim i trzecim roku uprawy były generalnie wyższe niż miskanta, jednak w żadnym obiekcie plon biomasy tego gatunku nie przekroczył 8 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Odwrotną zależność wysokości plonowania w kolejnych latach uprawy stwierdzono u topinamburu, który zdecydowanie najwyżej plonował w pierwszym roku uprawy. W obiekcie, w którym zastosowano poferment toryfikowany w dawce 170 kg ha⁻¹ N dał wysoki plon (13,5 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.). Była to ponad 2-krotnie więcej niż w obiekcie kontrolnym. W drugim roku uprawy gatunek ten plonował niżej, a najwyższe plony (ok. 10 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m.) uzyskano w obiektach, w których zastosowano poferment mokry i toryfikowany w wyższej dawce. Natomiast w trzecim roku uprawy plony biomasy topinamburu były najniższe ze wszystkich badanych gatunków i zawierały się w przedziale 2-4 Mg ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. Spadek plonowania tego gatunku w kolejnych latach uprawy wynikał z nasilającego się żerowania dzików, które w okresach późno jesiennych wyjadały podziemne bulwy oraz powodowały wywracanie się roślin.

Cel 4. Analiza produkcji biomasy z różnych odmian wierzby w uprawie komercyjnej za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych.

W badaniach przedstawionych w pracy P5 dokonano analizy środowiskowej produkcji biomasy 7 klonów i odmian wierzby z wielkoobszarowej plantacji komercyjnej. W tym celu przeprowadzono ocenę cyklu życia badanych odmian i klonów wierzby, zwłaszcza dla emisji gazów cieplarnianych w zależności od przyjętej odległości transportowej uzyskanych zrębków. Ponadto celem badań było wskazanie ogniw łańcucha produkcji i dostaw najniekorzystniej wpływającego na środowisko. Jako granicę systemu przyjęto produkcję roślin wierzby do bramy zakładu konwersji (biorafinerii). W granicę systemu włączono: przygotowanie stanowiska, przygotowanie materiału sadzeniowego, nawożenie, sadzenie wierzby, pielęgnację chemiczną oraz mechaniczną, zbiór

jednoetapowy roślin, transport połowy zrębków, załadunek i transport zrębków wierzby do zakładu konwersji oraz likwidację plantacji. W pracy przyjęto trzy odległości transportowe biomasy: 25, 50 i 100 km. Założono, że okres użytkowania plantacji będzie wynosił 21 lat, a rośliny będą zbierane w cyklach trzyletnich. Wysokość plonów została przyjęta na podstawie wyników przedstawionych w pracy P1. W badaniach uwzględniono wpływ na środowisko emisji z produkcji herbicydów i nawozów mineralnych, emisje związane z zastosowaniem nawozów azotowych i fosforowych. W granicy systemu włączono bilans CO₂ związany z sekwestracją węgla organicznego w glebie oraz produkcję i użytkowanie pojazdów transportu drogowego.

Etap oceny wpływu cyklu życia uprawy wierzby został określony metodą CML 2 baseline 2000, z której wybrano sześć kategorii wpływu na środowisko: wyczerpywanie zasobów abiotycznych (abiotic depletion), zakwaszenie (acidification), eutrofizacja (eutrophication), globalne ocieplenie (global warming), ekotoksyczność w wodach słodkich (fresh water aquatic ecotoxicity), ekotoksyczność dla systemów lądowych (terrestrial ecotoxicity).

Wyniki charakteryzacji produkcji i transportu (dystans 25 km) 1 Mg s.m. zrębków wierzby dla plonu minimalnego (klon UWM 155), maksymalnego (klon UWM 006) i średniego wykazały, że najwyższy wpływ na środowisko wykazuje klon najniżej plonujący. Stwierdzono, że udział i wysokość wpływu na środowisko poszczególnych etapów produkcji biomasy zmieniał się wraz z wysokością otrzymanego plonu. Wpływ produkcji 1 Mg s.m. zrębków najwyższej plonującego klonu UWM 006 (obecnie odmiana Żubr) był od 2 do 3 razy niższy niż klonu o najniższym plonie.

Rozpatrując wyniki badań dla średniego plonu biomasy wierzby stwierdzono wysoki wpływ na środowisko nawożenia mineralnego w kategoriach abiotic depletion i global warming (odpowiednio 38% i 74% udziału). Wysoki udział miał też zbiór wierzby. Był on znaczny dla abiotic depletion (30%), acidification (28%) oraz global warming (18%). Transport drogowy stanowił 15% w kategorii abiotic depletion i 11% we fresh water aquatic ecotoxicity. W badaniach zauważono wpływającą pozytywnie na obniżenie global warming (aż o 67%) sekwestrację węgla organicznego w glebie.

Analizy wykazały, że zabiegi poniesione na założenie i prowadzenie plantacji w przeliczeniu na 1 Mg s.m. były zbliżone, zarówno dla plonu minimalnego (klon UWM 155) jak i maksymalnego (UWM 006). Wyjątek stanowiło nawożenie NPK, które miało znacznie wyższy udział przy produkcji biomasy klonu UWM 155. Zabiegi te stanowiły 29% w kategorii fresh water ecotoxicity i aż 85% dla eutrophication. Natomiast dla UWM 006 wartości te wynosiły odpowiednio 15 i 62%. Znaczący wzrost udziału zabiegów produkcyjnych odnotowano dla klonu wyżej plonującego, co wiązało się z wyższymi nakładami poniesionymi na zbiór i transport biomasy. Przykładowo, udział w zbiorze i transporcie połowym i drogowym był dwu-, a nawet trzykrotnie wyższy dla klonu UWM 006 niż UWM 155. Odnotowano, że wpływ sekwestracji węgla organicznego w glebie na obniżenie emisji gazów

cieplarnianych był niższy dla plonu minimalnego niż maksymalnego. Wyższa redukcja emisji u klonu UWM 006 wiązała się z jego wysokim plonem biomasy.

Emisja CO₂ wynosiła średnio 35,97 kg Mg⁻¹ s.m. lub 2,12 kg ekw. CO₂, w przeliczeniu na 1 GJ zawarty w zrębkach wierzby transportowanych na 25 km. Przyjęty model sekwestracji węgla w glebie zakładał jej zwiększenie wraz ze wzrostem plonu biomasy (Grogan & Matthews, 2001), dlatego też najniższą emisję gazów cieplarnianych odnotowano dla wysokoplonujących klonów UWM 006 i UWM 043. Wartości te wynosiły odpowiednio 19,01 i 23,17 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂, lub 1,12 i 1,37 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂. Dla pozostałych odmian wartość tego wskaźnika zawierała się w przedziale od 36,29 (Start) do 97,33 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ (UWM 155), co dało odpowiednio 2,14 i 5,92 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂. Po zwiększeniu odległości transportowej do 50 km emisja zwiększyła się średnio o 24%, natomiast przy transporcie na 100 km wartość tego wskaźnika wzrosła dwukrotnie, w porównaniu do dystansu 25 km. Wzrost emisji ekwiwalentów CO₂ odnotowano dla wysokoplonujących odmian i klonów; ponad dwukrotnie dla UWM 043 (obecnie Ektur) i UWM 006, natomiast dla pozostałych wynosił on od 29% do 71%. Należy zauważyć, że emisje gazów cieplarnianych dla klonów UWM 043 i UWM 006 były nadal niskie w porównaniu do emisji dla odmian niższej plonujących, a transportowanych tylko na 25 km.

Cel 5. Analiza wpływu różnych metod wzbogacania gleby na produkcję ślazuwca pensylwańskiego za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych

Celem badań opisanych w pracy P6 było określenie wpływu na środowisko uprawy i pozyskania biomasy ślazuwca pensylwańskiego z doświadczenia opisanego w pracy P4, za pomocą oceny cyklu życia. Przyjęto granicę systemów badań od kołyski do bramy gospodarstwa, a jednostkami funkcjonalnymi był 1 Mg s.m. oraz 1 GJ energii zawarty w biomacie. Granice systemu obejmowały produkcję i wykorzystanie nawozów z poferementu i nawozów mineralnych, zabiegi agrotechniczne i transport roślin z pola do gospodarstwa. Założony okres użytkowania plantacji wynosił 15 lat. Granica systemu badań obejmowała pozyskanie poferementu, nawozów oraz pozostałych środków produkcji wykorzystywanych do produkcji ślazuwca. W badaniach uwzględniono emisje gazów cieplarnianych związane z przemianami węgla organicznego i azotu mineralnego w glebie oraz emisje do atmosfery NH₃, NO_x, NMLZO (niemetanowe lotne związki organiczne), pyłów oraz wymywanie związków azotu i fosforu. Ocenę wpływu określono metodą ReCiPe Midpoint i uwzględniono 8 kategorii oddziaływania na środowisko: zmiany klimatu (climate change), toksyczność dla ludzi (human toxicity), tworzenie pyłu zawieszonego (particulate matter formation), zakwaszenie gleby (terrestrial acidification), eutrofizacja wód słodkich (freshwater eutrophication), ekotoksyczność dla ekosystemów lądowych (terrestrial ecotoxicity) i wód słodkich (freshwater ecotoxicity) i wyczerpywanie zasobów kopalnych (fossil depletion).

Emisja gazów cieplarnianych dla kontroli wynosiła 95,94 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub 5,3 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂. Korzystniejszy wpływ na climate change miała uprawa ślazu w obiektach z pofermentem suszonym (DD) i toryfikowanym (TD). Przy zastosowaniu TD, emisja ekwiwalentów CO₂ była niższa o 37 i 86%, odpowiednio dla TD 85 i TD 170 w stosunku do wariantu C. Natomiast wariant DD 85 skutkował niską emisją gazów cieplarnianych (3,0 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub 0,2 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂), zaś zastosowanie wariantu DD 170 przyczyniło się do ujemnej emisji (-24,7 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub -1,4 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂). W tym przypadku sekwestracja węgla glebowego z nadwyżką zrekompensowała emisję gazów cieplarnianych. Zastosowanie pozostałych sposobów i dawek nawożenia skutkowało zwiększeniem wpływu na climate change w porównaniu do kontroli, nawet 5-krotnie.

W kategorii human toxicity wszystkie sposoby nawożenia oddziaływały niekorzystnie na środowisko niż C. Nawożenie roślin pofermentem mokrym (WD) i suchym (DD) w obu dawkach było najmniej niekorzystne dla środowiska w porównaniu do kontroli (C) (emisje od 3 do 4 razy wyższe). Nawożenie mineralne w obu dawkach (MF 85 i MF 170) skutkowało odpowiednio 9 i 13-krotnie wyższym wpływem na human toxicity niż kontrola. Najniekorzystnie na środowisko wpłynęło zastosowanie do uprawy pofermentu toryfikowanego (TD) w obu dawkach.

Particulate matter formation było wyższe we wszystkich sposobach nawożenia ślazu w porównaniu do kontroli. Wyższy wpływ wynikał z wykorzystania energii do produkcji nawozów ich suszenia, toryfikacji i z wykorzystania maszyn do nawożenia. Najniższy wpływ w tej kategorii w porównaniu do kontroli (C) odnotowano dla obiektów z nawożeniem mineralnym (MF 85 i MF 170), dla których emisja była odpowiednio o 33 i 66% wyższa. Najwyższym wpływem w tej kategorii charakteryzował się wariant TD 170 (prawie 3,7-krotnie wyższy wpływ niż dla C).

Wykorzystanie każdego ze sposobów nawożenia wpływało niekorzystnie na terrestrial acidification w porównaniu do kontroli (C). Najniższą emisją w porównaniu do C charakteryzował się wariant MF 85 (8-krotnie wyższe oddziaływanie na środowisko), a najwyższą TD 170 (ponad 44-krotnie).

Wykorzystanie nawozów powodowało wzrost oddziaływania produkcji biomasy ślazu na freshwater eutrophication; 30-56-krotnie w porównaniu do kontroli, odpowiednio dla DD 85 i TD 170. Zastosowanie wyższej (170 kg ha⁻¹) dawki azotu w nawozach z pofermentu skutkowało wzrostem eutrofizacji. Natomiast w nawozach mineralnych najwyższy wpływ w tej kategorii miały nie tylko emisje polowe, lecz również wytwarzanie nawozów fosforowych.

Choć produkcja biomasy ślazu z wykorzystaniem nawozów miała wyższy wpływ na terrestrial ecotoxicity, w porównaniu do kontroli (C), to prócz zastosowania pofermentu toryfikowanego (TD) w obu dawkach emisja ta nie była znacząco wyższa i wynosiła od 0,008 do 0,024 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. 1,4-DB, odpowiednio dla DD 85 i MF 170. Natomiast toryfikowanie powodowało

dotatkowe wykorzystanie energii cieplnej i elektrycznej, a w konsekwencji ponad 115-krotny wzrost oddziaływania wariantu TD 170 na terrestrial ecotoxicity.

Wpływ sposobów nawożenia na produkcję biomasy ślazu w kategorii freshwater ecotoxicity był od 39 do 324% wyższy w porównaniu do kontroli, odpowiednio dla wariantów WD 170 i MF 170. W wariantach WD 170 i MF 170 najwyższy wpływ w tej kategorii miało wykorzystanie maszyn rolniczych oraz zastosowanie herbicydu totalnego. Natomiast w wariantach WD 170 i MF 170 wysoki wpływ powodowała produkcja nawozów mineralnych.

Fossil depletion dla wariantów produkcji biomasy z zastosowaniem nawożenia było od 2 do ponad 5-krotnie wyższe w porównaniu do kontroli, odpowiednio dla DD 85 i MF 170. W wariantach DD 85 i MF 170 najwyższe fossil depletion przypadało na wykorzystanie paliw do maszyn rolniczych. Natomiast w wariantach DD 85 i MF 170 zdecydowanie najwyższe oddziaływanie w tej kategorii wpływu przypadało na zużycie paliw kopalnych do produkcji nawozów mineralnych.

Cel 6. Analiza wpływu różnych sposobów nawożenia na produkcję topoli za pomocą oceny cyklu życia, z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych

Celem badań opisanych w pracy **P7** było określenie wpływu na środowisko uprawy i pozyskania topoli w doświadczeniu opisanym w pracy **P3** (z wyłączeniem wariantów z zastosowaniem mikoryzy), za pomocą oceny cyklu życia. Przyjęto granicę systemów badań od kołyski do bramy gospodarstwa. Jednostkami funkcjonalnymi były 1 ha, 1 Mg suchej biomasy oraz 1 GJ. Granice systemu obejmowały produkcję i wykorzystanie nawozów i ligniny, operacje agrotechniczne, uprawę topoli, zbiór i transport zrębków z pola do gospodarstwa. Założony okres użytkowania plantacji wynosił 20 lat. W badaniach uwzględniono emisje gazów cieplarnianych związane z przemianami węgla organicznego i azotu mineralnego w glebie. Ponadto uwzględniono emisje do atmosfery oraz wymywanie tak jak w pracy **P6**. Ocenę wpływu określono metodą ReCiPe Midpoint. Uwzględniono te same kategorie wpływu co w pracy **P6**.

Emisja gazów cieplarnianych z uprawy topoli, bez zastosowanego nawożenia (C), wynosiła 25,17 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub 1,49 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂. Najwyższy udział w emisji ekwiwalentów CO₂ miał zbiór biomasy siewkarnią (58,8%), a następnie likwidacja plantacji (15,7%). Przy wariantach nawożenia mineralnego (F) emisja gazów cieplarnianych była ujemna (-3,37 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub -0,20 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂). Udział w climate change zbioru biomasy wyniósł 42%, a produkcji nawozów mineralnych 39%. Emisja z procesów produkcyjnych w obiekcie z zastosowaniem ligniny (L) była zbliżona do F, lecz produkcja ligniny charakteryzowała się niższą emisją gazów cieplarnianych niż produkcja nawozów mineralnych. Ponadto z ligniną dostarczano więcej węgla organicznego, co skutkowało ujemną emisją (-37,0 kg Mg⁻¹ s.m. ekw. CO₂ lub -2,19 kg GJ⁻¹ ekw. CO₂). Podobnie jak w wariantach C i F zbiór biomasy był etapem o najwyższym wpływie na climate change (47,2% udziału).

Choć zastosowanie ligniny łącznie z nawożeniem mineralnym (LF) skutkowało najwyższym plonem biomasy i energii to nie dało to najniższej emisji gazów cieplarnianych ($-20,3 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. CO}_2$ lub $-1,20 \text{ kg GJ}^{-1} \text{ ekw. CO}_2$). Połączenie tych dwóch sposobów nawożenia skutkowało niższą emisją w kategorii climate change, niż uprawa topoli w wariantach z nawożeniem mineralnym (F) oraz bez nawożenia (C).

Najniższy wpływ na particulate matter formation określono w uprawie topoli nawożonej ligniną ($0,253 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. PM}_{10}$). W pozostałych wariantach emisja była o ok. 25% wyższa i wynosiła $0,315\text{-}0,320 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. PM}_{10}$. We wszystkich wariantach uprawy emisje połowe stanowiły 41-55% udziału tej kategorii wpływu. Wysokim udziałem (w zakresie 28-35%) charakteryzował się również zbiór topoli.

Zastosowanie wariantów F i LF znacząco wpłynęło na terrestrial acidification; ponad 2.5-krotnie w stosunku do kontroli ($0,27 \text{ kg Mg s.m. ekw. SO}_2$). Zastosowanie samej ligniny spowodowało wzrost emisji w tej kategorii o 19% w stosunku do C. W wariantach F i LF produkcja i zastosowanie ligniny i nawozów mineralnych stanowiło odpowiednio 66 i 80% udziału. Przy wariacie L oraz C najwyższy udział w tej kategorii wpływu miał zbiór biomasy, odpowiednio 54 i 64%. Zauważono, że w wariacie LF, całkowita emisja na 1 Mg s.m. była prawie taka sama jak w wariacie F.

Najwyższy wpływ na freshwater eutrophication miała produkcja topoli w obiekcie, w którym stosowano ligninę i nawożenie mineralne (LF) ($0,027 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. P}$). Wysoki udział miała tu produkcja nawozów (36%) oraz produkcja ligniny (34%). Zastosowanie ligniny (L) czy nawożenia mineralnego (F) było również mniej korzystne dla środowiska niż wariant kontrolny (C), a emisja wynosiła, odpowiednio $0,016$ i $0,020 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. P}$. W tych wariantach produkcja nawozów stanowiła ok. 60% udziału. Natomiast w wariacie C najwyższy udział w emisji miał zbiór biomasy (46%).

Najwyższy wpływ na human toxicity miał wariant LF ($19,8 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. 1,4 DB}$). Aż 63% udziału miała tu produkcja ligniny i nawozów mineralnych, a 24% zbiór biomasy. Zbliżone wyniki, otrzymano dla wariantu L ($18,3 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. 1,4 DB}$). Najwyższy udział w emisji miała produkcja ligniny (58% udziału), a następnie zbiór biomasy (24%). W wariacie F emisja była o 78% niższa w porównaniu do LF, a najwyższy wpływ na środowisko w tej kategorii miały zbiór (43%) oraz produkcja nawozów (32%). Kontrola miała najniższy wpływ na środowisko z najwyższym udziałem zbioru biomasy i likwidacji plantacji.

Najniższy wpływ w kategorii terrestrial ecotoxicity miała uprawa topoli bez nawożenia (ok. $0,005 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. 1,4 DB}$). Następnie wpływ na terrestrial toxicity rósł proporcjonalnie w kolejności dla F, L i LF, odpowiednio o 14, 37 i 56%. W wariantach L i LF najwyższy udział w tej kategorii wpływu miała produkcja ligniny (odpowiednio 42 i 32%) i zbiór biomasy (odpowiednio 30 i 26%). Przy zastosowaniu wariantu F najwyższy udział w terrestrial toxicity miał zbiór (36%) i

produkcja nawozów mineralnych (30%). Zbiór biomasy stanowił 41% udziału wariantu uprawy topoli bez nawożenia.

Najwyższy wpływ na freshwater ecotoxicity miała produkcja biomasy z zastosowaniem ligniny i nawozów mineralnych ($0.36 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. } 1,4 \text{ DB}$). Nieznacznie niższy wpływ określono dla wariantu L. Najwyższy udział, miała tu produkcja ligniny stanowiąca w L i LF odpowiednio 49 i 40%. Warianty C i F miały podobny wpływ na freshwater ecotoxicity, wynoszący $0.23 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. } 1,4 \text{ DB}$. Zarówno w wariantach C i F zbiór stanowił 36-37% udziału w tej kategorii na środowisko.

W kategorii fossil depletion, najwyższy wpływ na środowisko określono dla wariantu LF ($17.12 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. oleju}$), natomiast warianty L i F charakteryzowały się o około 15% niższym oddziaływaniem. Najniższy wpływ w tej kategorii określono dla kontroli ($12.45 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. oleju}$). We wszystkich wariantach uprawy najwyższy udział w tej kategorii miał zbiór topoli; od 43 do 59%, odpowiednio dla LF i C. W technologiach L i F duże ilości zasobów były zużywane do produkcji ligniny, a w F do produkcji nawozu azotowego.

Wnioski i rekomendacje

1. W przeprowadzonych doświadczeniach wielkoobszarowych wykazano, że wierzba uprawiana w rotacji trzyletniej, w warunkach północno-wschodniej Polski, może plonować na poziomie średnio $7.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$. Zarówno badane odmiany jak i warunki glebowe istotnie różnicowały wysokość plonu. Dlatego należy podkreślić, że bardzo ważnym aspektem dotyczącym plonu biomasy, energii czy związków chemicznych z jednostki powierzchni jest właściwy dobór odmiany, który decyduje o wysokiej produktywności. Badania wykazały, że należy dobierać odmiany wierzby uwzględniając wysokość uzyskanego plonu biomasy, a nie tylko tych posiadających wysokie wartości cech termofizycznych i chemicznych (np. wartości opałowej, celulozy, hemicelulozy). Dlatego też na podstawie wyników badań własnych można zarekomendować do upraw komercyjnych dwie nowe odmiany wierzby *Salix viminalis*: Żubr i Ekotur, jako dające wysokie plony biomasy ($14-16 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$), energii i związków chemicznych na potrzeby bioprzemysłu i energetyki.
2. W przypadku produkcji SRWC na słabym stanowisku glebowym w czteroletniej rotacji zbioru, stwierdzono istotne zróżnicowanie w zakresie plonu i jego wartości energetycznej, nie tylko pomiędzy gatunkami ale również sposobami wzbogacenia gleby. Stosunkowo wysokie plony suchej biomasy w doświadczeniu uzyskano dla wierzby (średnio $8,34 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$) i topoli ($8,21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$), natomiast u robinii akacjowej były one prawie 3-krotnie niższe. Topola i wierzba charakteryzowała się więc wysokim plonowaniem i wysoką wartością energetyczną plonu w czteroletniej rotacji. Natomiast robinia była znacznie oddalona od

potencjału wierzby i topoli i nie należy jej rekomendować do uprawy na cele przemysłowe i energetyczne w tego rodzaju technologii. Zastosowane sposoby wzbogacenia gleby powodowały wzrost plonowania, w porównaniu do kontroli. Wszystkie trzy gatunki SRWC dały najwyższe plony w wariacie z zastosowaniem ligniny wraz z nawożeniem mineralnym (LF) oraz z dodatkiem mikoryzy (MLF). Wysokie plony osiągnięto również w wariantach z samym zastosowaniem ligniny (L) oraz nawożeniem mineralnym (F). Dlatego powyższe warianty wzbogacenia gleby można zarekomendować do stosowania w produkcji gatunków SRWC na słabych glebach mineralnych.

3. Stwierdzono, że gatunki z grupy traw i bylin jak: miskant olbrzymi, ślazier pensylwański, słonecznik wierzbolistny i topinambur różnie reagowały na zastosowane nawożenie. Pozytywnie na stosowane sposoby nawożenia azotowego reagował topinambur oraz słonecznik wierzbolistny. Z kolei ślazier pensylwański, w trzecim roku uprawy w obiekcie kontrolnym, plonował równie wysoko jak przy nawożeniu mineralnym i wyżej niż przy organicznym. Natomiast w uprawie miskanta nawożenie okazało się praktycznie zbędne, a w trzecim roku uprawy w obiekcie kontrolnym uzyskiwano wyższe plony miskanta niż przy wszystkich rodzajach nawożenia organicznego. Na podstawie uzyskanych wyników do uprawy w warunkach klimatu północno-wschodniej Polski oraz na glebach lekkich, można wstępnie zarekomendować słonecznik wierzbolistny (średni plon $9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$) oraz topinambur (ok. $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$), które generalnie reagowały wzrostem plonu na zastosowane nawożenie. Również miskant olbrzymi oraz ślazier pensylwański mogą być interesującym źródłem biomasy lignocelulozowej szczególnie w kontekście zadawalających plonów w obiektach bez żadnego nawożenia. Badania te powinny być jednak zweryfikowane w dalszych latach użytkowania plantacji.
4. Produkcja biomasy wierzby cechowała się niskim wpływem na środowisko. Emisja gazów cieplarnianych dla wszystkich odmian w doświadczeniu wynosiła średnio $35,97 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m.}$ lub $2,12 \text{ kg GJ}^{-1} \text{ ekw. CO}_2$, natomiast dla najwyższej plonujących odmian Żubr i Ekotur była niższa o 47 i 36%. Powinno się jednak dążyć do obniżenia słabych ogniw łańcuchów produkcji, które najniekorzystniej wpływają na środowisko tj. nawożenia czy wysokiego zużycia paliw przy zbiorze i transporcie biomasy. Obniżenie wpływu na środowisko produkcji wierzby było by możliwe poprzez, np. zastosowanie nawozów o niższej emisyjności. Natomiast zużycie paliw można by ograniczyć przez efektywniejsze wykorzystanie maszyn i lepiej zorganizowanym transporcie polowym. Ponadto jedynie zrębki otrzymywane z wysokoplonujących odmian i klonów mogą być transportowane na odległości powyżej 50 km.

5. Rozważając pozyskanie biomasy ślazu pensylwańskiego jako surowca na biopaliwa i bioprodukty stwierdzono, że w określonych warunkach produkcyjnych można spełnić warunek niskiej emisji gazów cieplarnianych. Najkorzystniejszy wariant uprawy ślazu z pofermentem suchym w dawce $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (DD 170) przyczynił się do sekwestracji węgla (ujemnej emisji gazów cieplarnianych na 1 Mg s.m.), a wariant z połową dawki azotu (DD85 DD 85) cechował się bardzo niską emisją ($3,0 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. CO}_2$). Niestety stosowanie nawożenia we wszystkich formach miało wyższe oddziaływanie na środowisko w pozostałych kategoriach wpływu, niż uprawa bez nawożenia. Dlatego też należałoby poszukiwać rozwiązań zmniejszającego wpływ wariantów nawożenia np. poprzez wykorzystanie źródeł energii o niższej emisyjności do produkcji pofermentu toryfikowanego. Natomiast aby zwiększyć wykorzystanie fosforu można by stosować niższe dawki pofermentu suchego lub toryfikowanego, a brakujący azot dostarczyć z innymi nawozami bogatymi w ten element.
6. Produkcja biomasy topoli do bramy gospodarstwa wszystkich wariantów nawożenia charakteryzowała się ujemną emisją gazów cieplarnianych, a najniższą wartość uzyskano dla wariantu uprawy z zastosowaniem ligniny (L) ($-37,0 \text{ kg Mg}^{-1} \text{ s.m. ekw. CO}_2$). Jedynie w przypadku uprawy topoli bez nawożenia (C) emisja GHG była dodatnia, choć i tak niska. W roślinach przeznaczonych na cele energetyczne i bioprodukty jest to olbrzymią zaletą. Jednak zastosowanie nawozów mineralnych i ligniny z reguły wpływało niekorzystnie na środowisko w innych kategoriach wpływu. Po przeprowadzeniu analiz można więc zarekomendować stosowanie ligniny jako środowiskowo optymalnego sposobu nawożenia plantacji. Typowy wariant, który jest powszechnie stosowany, czyli nawożenie plantacji tylko nawozami mineralnymi, jest nieznacznie mniej korzystny środowiskowo. Natomiast stosowanie ligniny i nawozów mineralnych jednocześnie (LF) nie jest rekomendowane z uwagi na wysokie oddziaływanie w 5 z 8 badanych kategorii wpływu na środowisko.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

Przed doktoratem

Po ukończeniu studiów magisterskich w The School for Renewable Energy Science moje zainteresowania badawcze skupiły się na produkcji i wykorzystaniu wierzby na cele energetyczne oraz jej oddziaływania na środowisko. Podczas studiów doktoranckich realizowanych na Wydziale Kształtowania Środowiska i Rolnictwa UWM w Olsztynie wraz z zespołem Katedry Hodowli Roślin i Nasiennictwa (KHRiN) prowadziłem badania nad produktywnością 5 klonów i odmian wierzby uprawianej systemem krótkich rotacji (SRWC) (Załącznik 6.II.A1) oraz 6 klonów i odmian wierzby w nowym, opatentowanym przez UWM, systemie Eko-Salix (Załącznik 6.II.D2). Ponadto współprowadziłem badania

nad energetycznym i ekonomicznym aspektem wykorzystania dendromasy do ogrzewania domu jednorodzinnego, w porównaniu do paliw kopalnych (Załącznik 6.II.A2). W czasie realizacji studiów doktoranckich byłem wykonawcą międzynarodowych projektów badawczych z zakresu wykorzystania energii odnawialnej z biomasy (Coach Bioenergy) (Załącznik 6.II.I1) oraz wielokierunkowego wykorzystania biomasy na cele przemysłowe i energetyczne (EuroBioRef) (Załącznik 6.II.I2). Uczestniczyłem w tym czasie w międzynarodowej szkole letniej z zakresu wielokierunkowego wykorzystania biomasy (Załącznik 6.III.L1). Byłem również współautorem ekspertyzy dostępności substratu dla planowanej biogazowni w Mrągowie (Załącznik 6.III.M1).

Po doktoracie

W 2012 r., po obronie mojej wyróżnionej dysertacji i uzyskaniu stopnia doktora, zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta w KHRiN UWM w Olsztynie, gdzie razem z pracownikami Katedry realizowałem wielokierunkowe badania. Moje zainteresowania z zakresu produkcji i wykorzystania biomasy objęły różne gatunki wieloletnich roślin lignocelulozowych z grup: (i) traw (gatunki miskanta, spartina preriowa, lasecznicza trzcinowata), (ii) bylin (ślazowiec pensylwański, słonecznik wierzbolistny, topinambur, rożnik przerośnięty), (iii) drzew i krzewów uprawianych w krótkich rotacjach (SRWC – short rotation woody crops) (wierzba, topola, robinia akacjowa) i systemem Eko-Salix (wierzba). Ponadto podjąłem badania z niszowymi gatunkami roślin oleistych (lnianka siewna i katan abisyński) oraz różnymi rodzajami biomasy pochodzenia rolniczego i leśnego. Wśród realizowanych badań można wymienić następujące kierunki:

- produktywność wieloletnich roślin lignocelulozowych i jednorocznych roślin oleistych,
- jakość i wykorzystanie biomasy roślin lignocelulozowych oraz oleistych jako surowca na bioprodukty, cele energetyczne i paliwowe,
- koszty i opłacalność produkcji biomasy oraz energii z biopaliw stałych (zrębki, pelet, brykiet),
- energochłonność i efektywność energetyczna produkcji biomasy,
- ocena cyklu życia produkcji biomasy roślin lignocelulozowych, oleistych oraz produkcji etanolu z buraka cukrowego.

Badając produktywność wierzby miałem możliwość określenia plonowania oraz potencjału produkcyjnego sadzonek odmian i klonów wierzby, w okresie dziesięciu kolejnych jednorocznych rotacji zbioru. Najlepsze wyniki uzyskano dla klonu UWM 095 i odmiany Tur. Bardzo istotnym i pozytywnym wnioskiem było to, że w ciągu 10 kolejnych lat zbioru nie stwierdzono istotnego spadku plonu biomasy wraz z wiekiem plantacji (Załącznik 6.II.A25). Inne długoterminowe doświadczenia były realizowane w badaniach, w których analizowano plonowanie pięciu odmian wierzby uprawianej w czterech gęstościach sadzenia w okresie 12 lat uprawy. Wykazano, że

najwyższy plon biomasy można pozyskać z trzyletniej rotacji zbioru i z gęstości sadzenia 24 000 szt. sadzonek na hektar (Załącznik 6.II.A32). Wyniki dwóch powyższych doświadczeń są bardzo ważne z uwagi na to, że plony określono z długotrwałego okresu użytkowania plantacji (10-12 lat), a nie jak często bywa z pierwszych rotacji (z reguły 3-4 lata).

Różnorodność roślin wieloletnich wymaga doboru gatunków i odmian charakteryzujących się odpornością na warunki klimatyczne i siedliskowe oraz wysoką produktywnością. Dlatego wraz z pracownikami KHRiN współprowadziłem badania nad plonowaniem 26 genotypów wieloletnich roślin lignocelulozowych z grup dających biomasę w postaci drewna (11 genotypów wierzby, 3 topoli i robinia akacjowa), biomasę półdrewniałą (ślazowiec pensylwański, różnik przerośnięty, rdest sachaliński, rdest japoński i topinambur) i w postaci słomy (miskant chiński, cukrowy i olbrzymi, lasecznicza trzcinowata i spartina preriowa) uprawianych w tym samym doświadczeniu polowym, w tych samych warunkach glebowych i klimatycznych, co umożliwiło ich bezpośrednie porównanie. Najwyższe plony uzyskano dla wierzby (ponad $15 \text{ Mg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ rok}^{-1} \text{ s.m.}$). Z gatunków dających biomasę półdrewniałą najwyżej plonował słonecznik wierzbolistny a z traw miskant cukrowy (Załącznik 6.II.A30).

Cechy termofizyczne i chemiczne biomasy roślin celulozowych zależą od wielu czynników. W swoich badaniach analizowałem wpływ terminu zbioru na jakość biomasy roślin z grup traw (m.in. miskanty, spartina preriowa), bylin (ślazowiec, topinambur, gatunki rdestu, różnik przerośnięty) oraz SRWC (wierzba i topola). Termin zbioru nie miał istotnego wpływu na jakość biomasy SRWC i jej wartość opałową. Natomiast opóźnianie terminu zbioru bylin i traw miało znaczący, korzystny wpływ na jakość i zawartość energii w ich biomacie (Załącznik 6.II.A9, Załącznik 6.II.A28). Kolejnym badanym aspektem wpływającym na jakość biomasy była technologia zbioru wierzby wraz z różnymi sposobami jej przechowywania. W pracy Załącznik 6.II.A16 badałem biomasę wierzby pozyskiwaną biobalerem i przechowywaną w postaci zbalotowanych, całych pędów. Stwierdzono, że technologia ta korzystnie wpływała na jakość przechowywanej biomasy. Drugą analizowaną technologią był zbiór jednoetapowy pędów wierzby siewkarnią samojezdną i przechowywanie zrębków w stosach, z wykorzystaniem czterech sposobów ich okrycia. Okrycia z materiałów paroprzepuszczalnych powodowały ponad dwukrotne zmniejszenie wilgotności i prawie dwukrotne zwiększenie wartości opałowej przechowywanych zrębków (Załącznik 6.II.A19).

Kolejnym aspektem badawczym była ocena przydatności biomasy do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej oraz na potrzeby biopaliw II generacji (bioetanol). Współprowadzone przeze mnie badania wykazały, że skład chemiczny wierzby, topoli i robinii akacjowej umożliwia wykorzystanie tych gatunków do produkcji bioetanolu II generacji, z uwagi na wysoką zawartość celulozy i hemiceluloz w ich biomacie (Załącznik 6.II.A13). Kolejnym zagadnieniem było energetyczne

wykorzystanie biomasy (zrębki, pelet i brykiet) do ogrzewania domu jednorodzinnego, w warunkach północno-wschodniej Polski (Załącznik 6.II.A7, Załącznik 6.II.A17) oraz wykorzystanie biomasy wierzby do produkcji energii cieplnej i elektrycznej w technologiach spalania, współspalania i zgazowania, wraz z oceną redukcji gazów cieplarnianych, w porównaniu do paliw kopalnych (Załącznik 6.II.A18). We współpracy z pracownikami Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu prowadziłem badania nad jakością i opłacalnością wykorzystania biomasy rolniczej (wierzba i ślazier pensylwański, słoma i makuch rzepakowy) i trocin sosnowych z ośmiu rodzajów brykietów (Załącznik 6.II.A3) oraz zgazowanych zrębków wierzbowych do produkcji energii cieplnej (Załącznik 6.II.A5).

Badania nad kosztami i opłacalnością produkcji biomasy SRWC prowadziłem we współpracy z Dr. Hakkanem Rosenqvistem (Swedish University of Agricultural Sciences). W badaniach nad nowymi odmianami wierzby wskazano, że Żubr i Ekotur są najbardziej dochodowe (Załącznik 6.II.A12), natomiast analiza produkcji wierzby, topoli i robinii akacjowej w różnych wariantach wzbogacenia gleby wskazała, że najkorzystniejsze wskaźniki ekonomiczne uzyskano dla wierzby (Załącznik 6.II.A24). Wraz z zespołem KHRiN prowadziłem też inne badania nad kosztami i opłacalnością prowadzenia plantacji SRWC (Załącznik 6.II.D3, Załącznik 6.II.D4) jak i systemem Eko-Salix (Załącznik 6.II.D11).

Dane z doświadczeń ścisłych jak i wielkoobszarowych, z wieloletnimi roślinami lignocelulozowymi, umożliwiły analizę produkcji biomasy pod względem efektywności energetycznej. Realizowane badania nad oceną efektywności energetycznej produkcji wierzby na plantacji wielkoobszarowej, wykazały wysoki wskaźnik efektywności energetycznej produkcji biomasy badanych odmian i klonów (od 10,2 do 23,9) (Załącznik 6.II.A10). Również produkcja biomasy SRWC, traw i bylin z różnymi sposobami nawożenia i wzbogacenia gleby została przeanalizowana pod kątem efektywności energetycznej. W ramach tej tematyki i wykazano bardzo zróżnicowaną efektywność produkcji biomasy, gdzie wskaźnik efektywności energetycznej zawierał się w przedziałach od 10,6 do 28,9 dla gatunków SRWC oraz od 1,2 do 19,1 dla traw i bylin (Załącznik 6.II.A20, Załącznik 6.II.A21). Aspekt efektywności energetycznej badałem również w doświadczeniach z wierzwą uprawianą w systemie SRWC, pozyskiwaną w cyklach jednorocznych i trzyletnich, jak i w systemie Eko-Salix (zbiór w cyklu 5-letnim) (Załącznik 6.II.D8, Załącznik 6.II.D9, Załącznik 6.II.D13).

Przeprowadzone badania nad plonowaniem wieloletnich roślin lignocelulozowych, efektywnością energetyczną ich produkcji i zebrane z tych doświadczeń dane, umożliwiły mi analizę produkcji roślinnej pod względem jej wpływu na środowisko, za pomocą znormalizowanej metody (z serii ISO 14040) oceny cyklu życia. Wyniki prac dotyczyły głównie analiz stanowiących osiągnięcie naukowe ale również oceny produkcji katroanu abisyńskiego (jednorocznej rośliny oleistej), w porównaniu do rzepaku jarego, przy współpracy z naukowcami z greckiego Centre for Renewable Sources and Saving (Dr Myrsini Christou i Dr Efthimii Alexopoulou). Rezultaty badań pokazały, że uprawa katroanu skutkowała wyższym wpływem na środowisko, niż uprawa rzepaku jarego, a

głównym ogniwem niekorzystnego oddziaływania na środowisko była produkcja i wykorzystanie nawozów mineralnych (Załącznik 6.II.D7).

W 2013 r., po uzyskaniu przez zespół KHRiN interdyscyplinarnego projektu COSMOS, realizowanego w ramach programu badawczego Horizon 2020 (obecnie nadal realizowanego) (Załącznik 6.II.I4), moje badania poszerzyły się o gatunki roślin oleistych wykorzystywanych na potrzeby europejskiego przemysłu chemicznego. Jako koordynator i wykonawca tego projektu na UWM rozpocząłem pracę nad określeniem produktywności i jakości nasion genotypów dwóch gatunków roślin oleistych: lnianki siewnej i katranu abisyńskiego. Wyniki moich badań, dotyczących plonowania i jakości nasion (zawartość tłuszczu i kwasów tłuszczowych, białka, masa tysiąca nasion) dziewięciu genotypów lnianki siewnej, uprawianej w warunkach północno-wschodniej Polski, opublikowano wraz z wynikami uprawy tych genotypów w warunkach klimatycznych Kanady, Włoch, Grecji i Holandii (Załącznik 6.II.A23). Podczas przygotowywania tej publikacji współpracowałem z pracownikami takich jednostek jak: Centre for Renewable Sources and Saving (Grecja), Uniwersytet Boloński (Włochy), Uniwersytet w Wageningen (Holandia), i Linnaeus Inc. (Kanada). Ponadto opublikowałem wyniki efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji lnianki siewnej i katranu abisyńskiego w warunkach wielkoobszarowych plantacji komercyjnych (Załącznik 6.II.A27).

Wśród innych moich osiągnięć mogę wymienić opracowanie monografii wieloautorskiej z zakresu uprawy roślin lignocelulozowych (Załącznik 6.II.D14). Jestem również współautorem trzech rozdziałów w monografii (Załącznik 6.II.D15, Załącznik 6.II.D19, Załącznik 6.II.D20). W moim dorobku znajduje się również współautorstwo dwóch rozdziałów dotyczących traw i gatunków SRWC uprawianych na cele energetyczne w encyklopedii pt. „Encyclopedia of Sustainable Technologies”, wydaną przez Elsevier (Załącznik 6.II.D17, Załącznik 6.II.D18).

Poza trzema wyżej wymienionymi już międzynarodowymi projektami badawczymi, realizowałem zadania w dwóch innych międzynarodowych projektach z zakresu wykorzystania roślin do produkcji biogazu (z wieloletnich roślin lignocelulozowych) i bioetanolu (z buraka cukrowego) w ramach programu ERA-NET Bioenergy (Załącznik 6.II.I4, Załącznik 6.II.I5). Byłem wykonawcą projektu badawczego w ramach krajowego Programu Strategicznego „Zaawansowane Technologie pozyskania Energii” (Załącznik 6.II.I3). Obecnie realizuje zadania w dwóch krajowych projektach badawczych dotyczących wykorzystania biomasy roślin lignocelulozowych na cele wytwarzania wysokiej wartości bioproduktów (Załącznik 6.II.I7) oraz biomasy rolniczej i leśnej na cele energetyczne (Załącznik 6.II.I8), w ramach programu BIOSTRATEG 3.

W okresie swojej pracy naukowej, wraz z pracownikami KHRiN, otrzymałem tymczasowe wyłączne prawo do dwóch odmian wierzby UWM 006 (Żubr) i UWM 043 (Ekotur) (Załącznik 6.II.C1, Załącznik 6.II.C2). Z innych osiągnięć naukowych mogę wymienić 17 wygłoszonych referatów na konferencjach, w tym 5 na konferencjach międzynarodowych (Załącznik 6.II.K1-K17). Wyniki badań

prezentowałem w formie posteru 15 razy (Załącznik 6.III.B1-B15). Wykonałem łącznie osiem recenzji artykułów naukowych, w tym sześciu z listy JCR. Byłem wielokrotnie nagradzany za swoją działalność naukową i dydaktyczną. W latach 2011-2015 brałem udział w trzech stażach zagranicznych. Za najważniejszy z nich uważam mój pobyt w Uniwersytecie Stanforda (USA) w 2015 r., w ramach programu Top 500 Innovators – Science, Management, Commercialization Program (finansowanego przez MNiSW), na który aplikowałem i zakwalifikowałem się jako jeden z 500 polskich naukowców i brokerów innowacji (Załącznik 6.III.L3).

W mojej działalności dydaktycznej w latach 2012-2018 byłem promotorem 11 prac dyplomowych inżynierskich oraz 3 prac magisterskich. Jestem autorem lub współautorem 10 programów przedmiotów realizowanych na kierunkach rolnictwo, ochrona środowiska, odnawialne źródła energii, gospodarowanie surowcami odnawialnymi i mineralnymi. Prowadziłem zajęcia ze studentami na Wydziale Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Wydziale Nauk Technicznych oraz Wydziale Nauk o Żywności UWM w Olsztynie. Byłem autorem programu i opiekunem wycieczki studyjnej do Islandii studentów ochrony środowiska, w ramach kierunku zamawianego. Ponadto byłem wykładowcą i ekspertem w 1 programie europejskim i 1 krajowym (Załącznik 6.III.A1, Załącznik 6.III.A2).

W tabeli 1 przedstawiłem wykaz swojego dorobku naukowego. Ponadto szczegółowy wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki znajduje się w załączniku nr 6.

Tabela 1. Wykaz całościowego dorobku naukowego

Dorobek naukowy	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora	Razem
Publikacje naukowe z obliczonym współczynnikiem wpływu (IF), umieszczone w bazie JCR	2	37	39
Pozycje nie mające obliczonego IF:			
W języku angielskim	1	5	6
W języku polskim	1	7	8
Monografie	0	1	1
Rozdziały w monografiach	0	5	5
Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe	0	2	2
Ogółem	4	57	61
Suma punktów zgodnie z rokiem opublikowania	95	1388	1483
Sumaryczny IF zgodnie z rokiem opublikowania	4,855	114,043	118,898
Suma cytowań (bez autocytowań) wg Web of Science		160	
Indeks Hirscha wg Web of Science		12	

Literatura

1. Bacenetti J., González-García S., Mena A., Fiala M. 2012. Life cycle assessment: an application to poplar for energy cultivated in Italy. *Journal of Agricultural Engineering*, 43(2), 72-78.
2. Baldini M., Danuso F., Turi M., Vannozzi G.P. 2004. Evaluation of new clones of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) for inulin and sugar yield from stalks and tubers. *Industrial Crops and Products*, 19(1), 25-40.
3. Borzecka-Walker M., Faber A., Pudielko R., Kozyra J., Syp A., Borek R. 2011. Life cycle assessment (LCA) of crops for energy production. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 9(3-4), 698-700.
4. Buss W., Graham M.C., Shepherd J.G., Mašek O. 2016. Suitability of marginal biomass-derived biochars for soil amendment. *Science of The Total Environment*, 547, 314-322.
5. Clifton-Brown J.C., Lewandowski I. 2002. Screening *Miscanthus* genotypes in field trials to optimise biomass yield and quality in Southern Germany. *European Journal of Agronomy*, 16(2), 97-110.
6. Komisja Europejska 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment: updated bioeconomy strategy. Komisja Europejska, Bruksela, ss. 107.
7. Dahlin J., Nelles M., Herbes C. 2017. Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. *Resources, Conservation and Recycling*, 118, 27-38.
8. Department of Energy (DOE). 2004. Top value chemicals from biomass volume 1: Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. National Renewable Energy Laboratory, ss 76.
9. Felten D., Fröba N., Fries J., Emmerling C. 2013. Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (*Miscanthus*, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. *Renewable Energy*, 55(0), 160-174.
10. García A., González Alriols M., Labidi J. 2014. Evaluation of different lignocellulosic raw materials as potential alternative feedstocks in biorefinery processes. *Industrial Crops and Products*, 53(0), 102-110.
11. González-García S., Iribarren D., Susmozas A., Dufour J., Murphy R.J. 2012. Life cycle assessment of two alternative bioenergy systems involving *Salix* spp. biomass: Bioethanol production and power generation. *Applied Energy*, 95(0), 111-122.
12. Grogan P., Matthews R. 2001. Review of the potential for soil carbon sequestration under bioenergy crops in the U.K. . Institute of Water and Environment, Cranfield University. NF0418.
13. Kajaste R. 2014. Chemicals from biomass – managing greenhouse gas emissions in biorefinery production chains – a review. *Journal of Cleaner Production*, 75, 1-10.
14. Lafleur B., Thiffault E., Paré D., Camiré C., Bernier-Cardou M., Masse S. 2012. Effects of hog manure application on the nutrition and growth of hybrid poplar (*Populus* spp.) and on soil solution chemistry in short-rotation woody crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 155, 95-104.
15. Lindvall E., Gustavsson A.-M., Palmberg C. 2012. Establishment of reed canary grass with perennial legumes or barley and different fertilization treatments: effects on yield, botanical composition and nitrogen fixation. *GCB Bioenergy*, 4(6), 661-670.
16. Moreno T., Graziella M., Elena B., Maurizio Q., Giovambattista S., Enrico M., Angelo I., Lamberto D.R. 2017. Agro-Industry Sludge as a Potential Organic Fertilizer for Prompt Nitrogen Release. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(9), 999-1007.
17. Nabel M., Barbosa D.B.P., Horsch D., Jablonowski N.D. 2014. Energy Crop (*Sida Hermaphrodita*) Fertilization Using Digestate under Marginal Soil Conditions: A Dose-response Experiment. *Energy Procedia*, 59, 127-133.

18. Serapiglia M., Cameron K., Stipanovic A., Abrahamson L., Volk T., Smart L. 2012. Yield and Woody Biomass Traits of Novel Shrub Willow Hybrids at Two Contrasting Sites. *BioEnergy Research*, 6(2), 1-14.
19. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa, A. 2008. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass & Bioenergy*, 32(12), 1227-1234.
20. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Wroblewska H., Krzyżaniak M. 2011a. Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 217-223.
21. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A. 2011b. Willow biomass production under conditions of low-input agriculture on marginal soils. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1558-1566.
22. Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Przyborowski J., Klasa A. 2005. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant Soil and Environment*, 51(9), 423-430.
23. Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M. 2006. Productivity and calorific value of willow (*Salix* spp.) biomass in relation to selected agronomical factors. *Alternative plants for sustainable agriculture*, 5, 45-50.
24. Zhang X., Tu M., Paice M. 2011. Routes to Potential Bioproducts from Lignocellulosic Biomass Lignin and Hemicelluloses. *BioEnergy Research*, 4(4), 246-257.

Michał Krzyżaniak