

AUTOREFERAT

dotyczący osiągnięć w pracy naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

dr inż. Mariusz Kuglarz

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej
Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska
Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska

Bielsko-Biała, 2019 r.

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych	3
4. Wskazanie osiągnięcia	4
a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego	4
b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)	4
c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	6
Zakres tematyczny	6
Obróbka wstępna wybranych substratów lignocelulozowych metodami termiczno-chemicznymi i hydroliza enzymatyczna biomasy przetworzonej,	7
Przebieg i efektywność fermentacji alkoholowej uzyskanych hydrolizatów oraz procesy odzysku ksylozy z pozostałości po fermentacji.....	16
Przebieg i efektywność wytwarzania kwasu bursztynowego z uzyskanych hydrolizatów i pozostałości po fermentacji alkoholowej.....	18
Procesy odzysku kwasu bursztynowego z pozostałości pofermentacyjnych	23
Podsumowanie	26
Literatura:	28
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	30
Procesy oczyszczania ścieków komunalnych/przemysłowych, odcieków ze składowisk odpadów komunalnych i przeróbki powstających osadów ściekowych.....	30
Procesy kofermentacji i oczyszczania powstałych wód pofermentacyjnych	32
Współpraca z otoczeniem społecznym oraz popularyzacja nauki i innowacyjnych rozwiązań.....	33
Plany dalszej działalności naukowej	34
Podsumowanie dorobku habilitanta	34

1. Dane osobowe

Imię i Nazwisko: Mariusz Kazimierz Kuglarz

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

Doktor w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplina: Inżynieria Środowiska. Politechnika Śląska. Stopień naukowy nadany Uchwałą Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 24 luty 2012 r. Obrona doktoratu z wyróżnieniem nt. „Proces mezofilowej kofermentacji odpadów intensyfikowany promieniowaniem mikrofalowym”. Promotor: prof. dr hab. inż. Jolanta Bohdziewicz.

Magister inżynier, specjalność: Inżynieria Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Nauk o Materiałach i Środowisku, 4 lipiec 2006 r. Praca magisterska nt. „Problemy technologiczne oraz ekologiczne w produkcji olejów jadalnych z rzepaku i słonecznika”. Promotor prof. dr hab. inż. Jan Suschka.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska (poprzednio Wydział Nauk o Materiałach i Środowisku), Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, zajmowane stanowisko: asystent, 1/02/2008 – 31/03/2013.

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska (Wydział Nauk o Materiałach i Środowisku do 2015 roku), Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, zajmowane stanowisko: adiunkt (pracownik naukowo-dydaktyczny), 1.04.2013 r. – obecnie.

Odbyte staże:

Dania, Technical University of Denmark, DTU Environmental Engineering, staż dydaktyczno-naukowy, 6 miesięcy (od kwietnia do października 2012), jednostka kierująca: Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, pobyt finansowany w ramach projektu pt. „Budownictwo - mostem między tradycją regionu a nowoczesnością”.

Stany Zjednoczone, University of California, Berkeley, Haas School of Business, 9 tygodni (maj-lipiec 2013), wyjazd stażowo-szkoleniowy, instytucja kierująca: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa w ramach programu TOP 500 Innovators Science-Management-Commercialization. Staż naukowy University of California, Berkeley, Energy

Biosciences Institute (EBI), w ramach programu TOP 500.

Dania, Technical University of Denmark, DTU Environmental Engineering, staż naukowy, 4 miesiące (lipiec-październik 2014), na zaproszenie instytucji zagranicznej. W ramach stażu realizowałem badania pt. „Produkcja biogazu oraz wytwarzanie kwasu bursztynowego z konopi przemysłowych”.

Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, 3 miesiące (kwiecień-lipiec 2015), staż naukowo-dydaktyczny. Instytucja kierująca: Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, pobyt finansowany w ramach projektu pt. „Budownictwo - mostem między tradycją regionu a nowoczesnością”.

Dania, Technical University of Denmark, DTU Environmental Engineering, staż naukowy, 5 tygodni (sierpień-wrzesień 2015), jednostka kierująca: na zaproszenie instytucji zagranicznej.

Dania, Technical University of Denmark, DTU Environmental Engineering, staż naukowy, 4 tygodnie (sierpień 2016), jednostka kierująca: na zaproszenie instytucji zagranicznej.

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. nr 65, poz. 595 ze zm.)

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Podstawą do ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska jest cykl 8 monotematycznych publikacji (artykuły oznaczone w wykazie opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz w informacji o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki – I.B.1-I.B.8. – załącznik_5) zatytułowanych:

WPLYW WSTĘPNEJ OBRÓBKI BIOMASY LIGNOCELULOZOWEJ I JEJ HYDROLIZY ENZYMATYCZNEJ NA PRZEBIEG I EFEKTYWNOŚĆ PROCESÓW FERMENTACYJNYCH

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

Poniżej zamieszczam wybór publikacji do oceny w przewodzie habilitacyjnym stanowiących jednotematyczny cykl:

- I.B.1. Kuglarz M.,** Gunnarsson I.B., Svensson S.E., Prade T., Johansson E., Angelidaki I., 2014. Ethanol production from industrial hemp : effect of combined dilute acid/steam pretreatment and economic aspects. *Bioresource Technology*, vol. 163, s. 236-243. DOI:10.1016/j.biortech.2014.04.049
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 45. Impact Factor – 4.494
Mój udział procentowy szacuję na 55%.
- I.B.2. Gunnarsson I.B., Kuglarz M.,** Karakashev D., Angelidaki I., 2015. Thermochemical pretreatments for enhancing succinic acid production from industrial hemp (*Cannabis sativa L.*). *Bioresource Technology*, vol. 182, s. 58-66. DOI:10.1016/j.biortech.2015.01.126.
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 45. Impact Factor – 4.917
Mój udział procentowy szacuję na 40%
- I.B.3. Kuglarz M.,** Alvarado-Morales M., Karakashev D., Angelidaki I., 2016. Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from industrial hemp in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, vol. 200, s. 639-647. DOI:10.1016/j.biortech.2015.10.081.
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 45. Impact Factor – 5.651
Mój udział procentowy szacuję na 70%.
- I.B.4. Kuglarz M.,** Grübel K., 2017. Application of membrane filtration for integrated production of ethanol and carboxylic acids from pre-treated straw. *Desalination and Water Treatment*, vol. 69, s. 35-42. DOI:10.5004/dwt.2017.0709.
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 20. Impact Factor – 1.383
Mój udział procentowy szacuję na 90%.
- I.B.5. Kuglarz M.,** Grübel K., Bohdziewicz J., 2017. Utilization of membrane processes for separation of succinic acid after fermentation of Miscanthus biomass. *Desalination and Water Treatment*, vol. 73, s. 155-163. DOI:10.5004/dwt.2017.20497.
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 20. Impact Factor – 1.383
Mój udział procentowy szacuję na 70%.
- I.B.6. Kuglarz M.,** Alvarado-Morales M., Dąbkowska K., Angelidaki I., 2018. Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from rapeseed straw after dilute-acid pretreatment. *Bioresource Technology*, vol. 265, s. 191-199. DOI:10.1016/j.biortech.2018.05.099.
Punkty zgodnie z listą MNiSW: 45. Impact Factor – 5.807
Mój udział procentowy szacuję na 55%.
- I.B.7. Kuglarz M.,** Grübel K., 2018. Integrated production of biofuels (Ethanol and biogas)

and succinic acid from biomass after thermochemical pretreatments. *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 25(4), s. 521-536. DOI: 10.1515/eces-2018-0034

Punkty zgodnie z listą MNiSW: 15. Impact Factor – 0.700

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

I.B.8. Dąbkowska K., Alvarado-Morales M., **Kuglarz M.**, Angelidaki I., 2019. Miscanthus straw as substrate for biosuccinic acid production: focusing on pretreatment and downstream processing. *Bioresource Technology*, vol. 278, s. 82-91. DOI:10.1016/j.biortech.2019.01.051

Punkty zgodnie z listą MNiSW: 45. ImpactFactor – 5.807

Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Sumaryczny IF prac stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego wynosi **30,142** natomiast sumaryczna liczba punktów MNiSW wynosi **280**.

Mój wkład w powstanie wyżej wymienionych publikacji zawiera się w zakresie od 40 do 90%. Średni mój wkład w powstanie wymienionych publikacji wyniósł: 65%. Oświadczenia współautorów odnośnie ich udziału w powstaniu wspólnych publikacji zamieszczone zostały w załączniku_4.

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

Zakres tematyczny

Zakres tematyczny zaprezentowany w wyżej wymienionych pracach dotyczy kompleksowych badań oceny celowości i skuteczności sposobu wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej na skład biomasy przetworzonej oraz efektywności procesów wytwarzania z niej produktów końcowych, tj. etanolu, kwasu bursztynowego i biogazu. Przeprowadzone badania dotyczyły wstępnej obróbki wybranej biomasy roślinnej, a mianowicie: konopi przemysłowych (*Cannabis sativa L.*), miskanta olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus*) oraz słomy rzepakowej. Biomasa ta jest bogata w lignocelulozę (kompleks lignocelulozowy) i po odpowiedniej obróbce może zostać użyta w różnych sektorach gospodarki. Jak wiadomo kompleks lignocelulozy składa się z trzech frakcji: celulozy, hemicelulozy i ligniny. O ile dwa pierwsze składniki biomasy roślinnej stanowią długołańcuchowe polisacharydy hydrolizujące do cukrów prostych wykorzystywanych do produkcji biopaliw i/lub bio-produktów, o tyle ligniny są substratem stosowanym do produkcji energii i/lub ciepła. W przeciwieństwie do biomasy skrobiowej, takie materiały nie stanowią pożywienia dla człowieka, jednak ich

przetwórstwo jest bardziej skomplikowane i wymaga rozbicia kompleksu lignocelulozowego oraz hydrolizy cukrów. Efektywne rozdzielenie składników kompleksu lignocelulozowego wymaga jednak przeprowadzenia obróbki takiej biomasy, a jej sposób i efektywność zależy od końcowego przeznaczenia otrzymanych hydrolizatów, wykorzystywanych następnie w procesach fermentacyjnych. Jest to zazwyczaj realizowane z użyciem metod wstępnej obróbki i/lub enzymów. Z uwagi na złożoną i zwartą strukturę lignoceluloz, zastosowanie procesów enzymatycznych wymaga przeprowadzenia procesów wstępnych, mających na celu rozbicie struktury kompleksu lignocelulozowego (destrukcja hemicelulozy i lignin oraz zaburzenie krystalicznej struktury celulozy), co sprawia iż biomasa jest bardziej dostępna dla enzymów hydrolitycznych (Sun i in., 2016). Wykonane przeze mnie badania można podzielić na następujące obszary tematyczne:

- 1) obróbka wstępna wybranych substratów lignocelulozowych metodami termiczno-chemicznymi i hydroliza enzymatyczna biomasy przetworzonej,
- 2) przebieg i efektywność fermentacji alkoholowej uzyskanych hydrolizatów oraz procesy odzysku ksylozy z pozostałości po fermentacji,
- 3) przebieg i efektywność wytwarzania kwasu bursztynowego z uzyskanych hydrolizatów i pozostałości po fermentacji alkoholowej oraz
- 4) odzysk kwasu bursztynowego z pozostałości pofermentacyjnych.

Ad.1) Obróbka wstępna wybranych substratów lignocelulozowych metodami termiczno-chemicznymi i hydroliza enzymatyczna biomasy przetworzonej,

W pierwszej fazie badań przeprowadziłem wstępną obróbkę biomasy konopi przemysłowych (*Cannabis sativa L.*) oraz miskanta olbrzymiego (*Miscanthus × giganteus*) metodą termiczną wspomaganą kwasem siarkowym [B.I.1.]:

- biomasa z dodatkiem kwasu siarkowego (0,0; 0,5; 1,0; 2,0% wag.). została poddana działaniu wysokiej temperatury (140°C lub 180°C), a proces prowadzono w reaktorze ciśnieniowym do termicznej obróbki biomasy o obj. 10 dm³;
- badania prowadziłem dla stałego udziału biomasy w mieszaninach poddawanych obróbce, tj. 10% wag. Po dodaniu kwasu mieszaniny były poddawane działaniu pary wodnej w reaktorze w temperaturze 140°C przez 20 minut lub w temperaturze 180°C przez 10 min.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły wnioskować, iż zastosowanie metody termicznej (180°C), wspomaganiej 1% H₂SO₄ prowadzi do efektywnego rozbicia kompleksu lignocelulozowego, na co wskazywała wielkość stopnia hydrolizy frakcji hemiceluloz na poziomie 54-56% (w odniesieniu do początkowej ich ilości). Wzrost stężenia kwasu do 2%

podczas obróbki wstępnej doprowadził do znaczącego wzrostu strat cukrów C5 (> 25%) i C6 (> 9%) [I.B.1., I.B.2., I.B.5.].

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnej obróbki substratów lignocelulozowych oraz sporządzonych bilansów masowych poszczególnych ich komponentów (celuloza, hemiceluloza, ligniny) wyciągnąłem następujące wnioski [I.B.1., I.B.2., I.B.5.]:

- dla wszystkich zastosowanych warunków obróbki biomasy roślinnej, poza procesem z 2% kwasem siarkowym, odnotowano odzysk we frakcjach stałych - 95-97% celulozy (w odniesieniu do początkowej ilości w biomacie przed obróbką);
- nie uzyskano delignifikacji biomasy. Metody termiczne z dodatkiem kwasów mineralnych nie mają znaczącego wpływu na usunięcie frakcji lignin (Silverstein i in., 2007). Wykazano, że podczas tego rodzaju obróbki zawartość lignin może wzrosnąć w stosunku do ich początkowej ilości, na skutek wtórnej polimeryzacji rozpuszczonych lignin będącej wynikiem degradacji cukrów. Zjawisko to zaobserwowałem podczas przeprowadzanych badań, uzyskując odzysk lignin na poziomie do 102% ich początkowej ilości [I.B.1., I.B.2., I.B.5.].

W pracy wykazałem, iż sposób uprawy konopi przemysłowych (tradycyjny lub ekologiczny) nie ma znaczącego wpływu na efektywność wstępnej obróbki biomasy metodami termicznymi. Na podstawie uproszczonej analizy ekonomicznej obejmującej koszty zbioru, transportu i przechowywania biomasy, stwierdziłem, iż obróbka z zastosowaniem metody termicznej (180°C) wspomaganej 1% H₂SO₄ wykazała dodatni wynik ekonomiczny [I.B.1.]. Zaprezentowany powyżej fragment badań realizowałem podczas stażu podoktorskiego w „Technical University of Denmark, DTU Environmental Engineering” (od kwietnia do października 2012) [III.L.1.] oraz stażu w Energy Biosciences Institute (University of California, Berkeley) w ramach programu TOP 500 [III.L.2.]. Jednostki naukowe, w których prowadziłem przedmiotowe badania zaliczane są do wiodących oraz rozpoznawalnych na świecie zespołów badawczych, realizujących innowacyjne badania w kierunku wykorzystania biomasy lignocelulozowej. Skuteczność wyznaczonych warunków wstępnej obróbki biomasy konopi przemysłowych została również przeze mnie zweryfikowana i potwierdzona w odniesieniu, m.in. do obróbki biomasy słomy rzepakowej [I.B.4.].

Biorąc pod uwagę fakt, iż zastosowanie 2% H₂SO₄ w formie katalizatora termicznej obróbki biomasy lignocelulozowej (konopi przemysłowych) doprowadziło do znaczących strat cukrów, kolejnym celem moich badań naukowych było zbadanie, czy zwiększenie jego udziału powyżej 1% wag. (czyli wcześniej ustalonego stężenia jako najkorzystniejszego do rozbitcia kompleksu lignocelulozowego) wpłynie na poprawę efektywności prowadzonego procesu. Badania przeprowadziłem dla 1,0% wag. oraz 1,5% wag. udziału H₂SO₄

w mieszaniu reakcyjnej. Każdorazowo zachowano stały udział biomasy w mieszaninach poddawanych obróbce, tj. 10% wag., a mieszaniny poddawano działaniu pary wodnej w reaktorze wsadowym w temperaturze 180°C przez 10 min [I.B.3]. Pozytywnie potwierdzono możliwość zastosowania katalizatora procesu termicznej obróbki biomasy lignocelulozowej (konopi przemysłowych) w ilości 1,5% wag., co skutkowało efektywną dezintegracją kompleksu lignocelulozowego. Otrzymane w tych warunkach hydrolizaty (frakcje ciekłe) zawierały o ponad 30% więcej cukrów (glukozy i ksylozy), w odniesieniu do 1,0% wag. udziału H₂SO₄ podczas obróbki termicznej [I.B.3]. Nie odnotowano również w mieszaniu poreakcyjnej wzrostu stężeń produktów degradacji cukrów i/lub lignin (furfural, HMF, kwasy organiczne). Uzyskane wyniki badań poddałem analizie statystycznej, która zdecydowanie potwierdziła celowość zastosowania 1,5% wag. H₂SO₄ jako katalizatora procesu termicznej obróbki substratów lignocelulozowych [I.B.3].

Skuteczność zastosowania 1,5% wag. kwasu siarkowego jako katalizatora procesów termicznych potwierdziłem również w kolejnych badaniach zrealizowanych w jednostce macierzystej (Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej), po powrocie ze stażu naukowego w Danii (DTU Environment, 2014). Obejmowały one proces termicznej obróbki wstępnej miskanta (*Miscanthus x giganteus*) prowadzony w temperaturze 140°C i 180°C z dodatkiem różnych ilości katalizatora (0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0% wag. H₂SO₄) [I.B.5]. Najwyższy stopień usunięcia frakcji hemicelulozy (58-60%) uzyskano dla temp. 140°C z dodatkiem 1,5% wag. H₂SO₄. Obróbka *miskanta* w 180°C skutkowała znacząco mniejszymi stopniami hydrolizy frakcji celuloz, co było podyktowane generowaniem produktów ubocznych procesu rozkładu cukrów. W przeciwieństwie do biomasy konopi przemysłowych, obróbka traw energetycznych nie wymagała stosowania temperatury na poziomie 180°C. Wyznaczone warunki termicznej obróbki biomasy konopi przemysłowych i traw energetycznych wykorzystałem w dalszych etapach badań, tj. podczas obróbki biomasy przed zintegrowaną produkcją bioetanolu lignocelulozowego i/lub kwasu bursztynowego [I.B.3., I.B.5].

W większości dostępnych rozwiązań wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej, zawartość biomasy poddawanej obróbce wynosi ok. 10% mieszaniny reakcyjnej. Wciąż nie jest całkowicie zbadane i potwierdzone, w jakim stopniu można zwiększyć zawartość biomasy podczas jej obróbki termicznej z zastosowaniem kwasu siarkowego jako katalizatora i jednoczesnym zachowaniem wysokiej efektywności prowadzonego procesu oraz minimalnych strat cukrów. Dlatego też aspekt ten stanowił cel moich kolejnych zainteresowań badawczych opisanych w pracy [I.B.6]. Jak wiadomo wyższa zawartość biomasy w mieszaniu poddawanej obróbce termicznej jest bardziej korzystna ze względu na mniejsze zużycie energii wymaganej do przetworzenia jednostkowej ilości biomasy. Prowadzenie procesu dla wyższej zawartości

biomasy wpływa również korzystnie na koszty rozdzielania poszczególnych frakcji po obróbce biomasy, w szczególności przy założeniu, iż będą one przeznaczone do różnych celów, np. frakcja stała (cukry C6) do produkcji bioetanolu, natomiast frakcja ciekła (cukry C5) do produkcji kwasu bursztynowego i/lub biogazu.

W celu potwierdzenia ewentualnej możliwości prowadzenia procesu wstępnej obróbki termicznej dla zawartości biomasy w mieszaninach reakcyjnych przekraczających 10% wag., zaplanowałem następujący cykl badań doświadczalnych **[I.B.6]**:

- słomę rzepakową (jako przykład biomasy lignocelulozowej) poddałem obróbce termicznej w temp. 180°C prowadzonej przez 10 minut i katalizowanej 1% wag. H₂SO₄, czyli w warunkach wyznaczonych jako optymalne we wcześniejszych moich pracach doświadczalnych **[I.B.4.]**. Ilość użytego kwasu siarkowego w formie katalizatora była zgodna z danymi literaturowymi (Jung i in., 2013, Talebnia i in., 2015);
- badania przeprowadziłem dla następującego udziału biomasy w mieszaninach reakcyjnych: 10%, 15%, 20% oraz 25% wag. Po dodaniu kwasu zawartość reaktora wsadowego była poddawana działaniu pary wodnej w temperaturze 180°C przez 10 minut. Otrzymane wyniki badań poddałem analizie statystycznej (ANOVA).

Przeprowadzone prace doświadczalne oraz sporządzone bilanse masowe poszczególnych komponentów biomasy (celuloza, hemiceluloza, ligniny) pozwoliły wnioskować, że **[I.B.6]**:

- zawartość celulozy w biomacie przetworzonej wzrosła o 48-53% w porównaniu z jej początkową ilością. Przeróbka mieszanin zawierających 10-20% wag. biomasy nie wpłynęła negatywnie na stopień odzysku celulozy. Stopień hydrolizy frakcji hemiceluloz podczas prowadzonej obróbki biomasy w tych warunkach kształtował się na poziomie od 44 do 50%.
- Odnotowałem odzysk ok. 97-102% początkowej ilości lignin, co było związane z ich ponowną polimeryzacją;
- wzrost zawartości biomasy w mieszaninach reakcyjnych do 25% wag. doprowadził do pogorszenia efektywności procesu, a mianowicie obniżeniu uległa zawartość celulozy w materiale przetworzonym, stopień hydrolizy frakcji hemicelulozy oraz wzrosły straty cukrów C5 i C6. Obniżenie efektywności procesu było prawdopodobnie związane z mniejszą dostępnością katalizatora przypadającego na jednostkę przetwarzanej biomasy oraz utrudnioną dyfuzją pary wodnej przy wyższych ładunkach przetwarzanej biomasy (Sindhu i in., 2011, Mathew i in., 2011).

Jak wynika z powyższego, proces termiczny katalizowany kwasem siarkowym jest metodą skuteczną, powodującą rozbitcie kompleksu lignocelulozowego, szczególnie w kontekście usunięcia frakcji hemiceluloz (cukry C5). Metoda ta jednak posiada pewne wady

i ograniczenia, a mianowicie, nie jest znacząco efektywna w kontekście usuwania lignin z biomasy (delignifikacja), co ma kluczowe znaczenie dla procesu hydrolizy enzymatycznej biomasy przetworzonej. W związku z tym, kolejny kontynuowany kierunek badań był związany z przeprowadzeniem wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej, bazującej na wykorzystaniu czynników alkalicznych, w szczególności wodorotlenku sodu oraz metod polegających na zastosowaniu czynników utleniających (m.in. H_2O_2). Takie rozwiązania są uważane za skuteczne w delignifikacji biomasy i bardzo często pozwalają na usunięcie frakcji lignin do co najmniej 10% s.m., czyli poziomu wartości powszechnie uważanej za wpływającą korzystnie na dalsze etapy przeróbki biomasy, tj. procesy enzymatyczne. Procesy alkaliczne wymagają jednak zastosowania dłuższych czasów reakcji w porównaniu z metodami termicznymi wspomaganymi kwasami mineralnymi. Występuje także konieczność neutralizacji biomasy przetworzonej (usuwanie soli wapnia i sodu) (Cao i in., 2013).

W celu określenia wpływu substancji metod alkalicznych i utleniających na stopień delignifikacji biomasy przeprowadziłem następujące testy laboratoryjne [**I.B.2, I.B.8**]:

- biomasę poddałem działaniu 1% i 3% roztworowi NaOH (metoda alkaliczna) oraz 1% i 3% roztworowi H_2O_2 (metoda utleniająca, pH = 11,5). Badania zrealizowałem dla stałego udziału biomasy w mieszaninach poddawanych obróbce, tj. 10% wag. Po wprowadzeniu reagentów do roztworu, mieszaniny były poddawane działaniu temperatury rzędu 180°C przez okres 10 min., 140 °C przez 20 min., lub 121 °C przez 60 min. Po procesach obróbki, frakcję stałą od ciekłej oddzielono na drodze filtracji, a z frakcji ciekłej strącono ligniny. Tak jak poprzednio, uzyskane wyniki badań poddałem analizie statystycznej (ANOVA).

Po zastosowaniu metody utleniającej uzyskano porównywalną zawartość celulozy w biomacie przetworzonej, jak w przypadku prób z zastosowaniem najkorzystniejszych ilości kwasu siarkowego. Obróbka z NaOH skutkowała uzyskaniem mniejszej zawartości celulozy w biomacie przetworzonej w porównaniu do metody termicznej z zastosowaniem H_2SO_4 jako katalizatora. Nie odnotowano jednak znaczących strat celulozy w wyniku obróbki wstępnej [**I.B.1, I.B.2**].

Obecność w roztworze 1-3% NaOH skutkowała uzyskaniem mniejszych wartości stopnia hydrolizy frakcji hemicelulozy w porównaniu z H_2O_2 . Ponadto, metoda ta (NaOH) charakteryzowała się największymi stratami frakcji hemicelulozy (> 20% początkowej ilości przed obróbką) z wszystkich do tej pory testowanych metod wstępnej obróbki. Straty cukrów w procesie obróbki wstępnej biomasy metodą alkaliczną stanowią jedną z głównych jej wad. Stwierdziłem również, że zastosowanie metod alkalicznych/utleniających nie wiązało się z generacją większych ilości inhibitorów i produktów degradacji rozkładu cukrów i/lub lignin,

niż miało to miejsce po zastosowaniu metody termicznej z kwasem siarkowym.

Tak więc, ta faza badań pozwoliła mi na osiągnięcie założonego stopnia usunięcia frakcji lignin (< 10% s.m.), czyli do poziomu uważanego za najkorzystniejszy do przeprowadzenia procesu hydrolizy enzymatycznej (Celluclast® 1.5 i Novozyme 188). Uzyskane rezultaty badań opisałem w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Bioresource Technology* [I.B.2.] oraz zaprezentowałem podczas konferencji naukowej „Zapobieganie zanieczyszczeniu, przekształcaniu i degradacji środowiska”: XIX Konferencja Naukowo-Techniczna, Bielsko-Biała, 16-18 listopada 2016 [III.B.22.].

Otrzymane rezultaty badań procesu hydrolizy enzymatycznej (biomasa przetworzona) umożliwiły mi wyciągnąć następujące wnioski [I.B.2, I.B.8]:

- proces hydrolizy enzymatycznej bez zastosowania wstępnych procesów obróbki biomasy lignocelulozowej charakteryzuje się niską efektywnością ponieważ stopień konwersji celulozy do glukozy wyniósł ok. 20-30%. Niski stopień hydrolizy glukozy wynikał ze specyfiki materiału badawczego oraz prawdopodobnie jest również związany z wysokimi wartościami indeksu krystaliczności celulozy (Kamireddy i in., 2013);
- potwierdziłem pozytywny wpływ obróbki alkalicznej i metodą (H_2O_2) na wysoką efektywność procesu hydrolizy enzymatycznej, uzyskując wartości hydrolizy glukozy na poziomie 80-90%. Można to wytłumaczyć efektywną delignifikacją biomasy przed hydrolizą enzymatyczną.

W związku z tym mogłem założyć, że przeprowadzona wstępna obróbka biomasy metodami alkalicznymi/utleniającymi pozwoliła mi na rozwiązanie problemu technologicznego, polegającego na obniżeniu zawartości **frakcji lignin** w biomase przetworzonej do poziomu zapewniającego wysoką skuteczność procesu hydrolizy enzymatycznej oraz zapewniła częściową solubilizację frakcji hemicelulozy (frakcje ciekłe po obróbce). Jednak niska zawartość cukrów C5 uniemożliwia ich wykorzystanie do produkcji biopaliw i chemikaliów, co skutkuje w praktyce znacznymi stratami glukozy i ksylozy [I.B.2.].

W związku z powyższym, opracowanie efektywnej metody wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej, zapewniającej odpowiednio wysoki stopień frakcjonowania komponentów biomasy oraz minimalizującej straty cukrów nadal stanowiło dla mnie **wyzwanie technologiczne**. W ramach prezentowanego osiągnięcia naukowego przedstawiłem opracowaną przeze mnie innowacyjną metodę obróbki biomasy lignocelulozowej gliceryną odpadową po produkcji biodiesla, jako czynnik dezintegrujący kompleks lignocelulozowy. Biomasa (miskant olbrzymi, konopie przemysłowe) zostały poddane obróbce z zastosowaniem gliceryny odpadowej w warunkach kwasowych (1,0-1,5% H_2SO_4) oraz alkalicznych (1-3% NaOH) [I.B.7., I.B.8]. Gliceryna uważana jest za atrakcyjny czynnik wywołujący solubilizację

lignin, czyli usuwanie lignin z frakcji stałej biomasy, wzbogaconej w celulozę. Celem naukowym przeprowadzonych w tym etapie badań było poznanie procesów zachodzących podczas wstępnej obróbki (rozdrabnianie + obróbka termiczna z użyciem gliceryny w warunkach kwasowych lub alkalicznych) wybranej biomasy lignocelulozowej (konopie przemysłowe, słoma rzepakowa i trawy energetyczne) oraz ocena jej wpływu na proces enzymatycznej hydrolizy. Poznanie procesów zachodzących podczas nowo opracowanej metody obróbki danego typu substratów ma kluczowe znaczenie w przypadku opracowania efektywnych technologii produkcji biopaliw oraz chemikaliów.

W celu określenia wpływu zastosowania gliceryny jako czynnika dezintegrującego kompleks lignocelulozowy, zaplanowałem następujący tok badań przeprowadzonych w skali laboratoryjnej, a mianowicie biomasę lignocelulozową (konopie przemysłowe i trawy energetyczne) poddałem działaniu frakcji glicerynowej o udziale 90% wag. gliceryny oraz mieszanin frakcji gliceryny i wody, zawierających odpowiednio 70 i 80% wag. gliceryny **[I.B.7, I.B.8]**. Przeprowadzone badania wstępnej obróbki z zastosowaniem gliceryny jako czynnika dezintegrującego kompleks lignocelulozowy pozwoliły mi na stwierdzenie, że **[I.B.7, I.B.8]**:

- obróbka biomasy z zastosowaniem frakcji glicerynowej bez dodatku wody nie doprowadziła do efektywnej dezintegracji kompleksu lignocelulozowego, zarówno w przypadku przeróbki miskanta, jak i konopi przemysłowych;
- udział wody w mieszaninie reakcyjnej (80% wag. frakcji gliceryny + 20% wag. wody) wpłynął korzystnie na stopień hydrolizy frakcji hemiceluloz oraz stopień delignifikacji biomasy. Efekt ten został przypisany procesowi autojonizacji wody w wysokich temperaturach, co przyczyniło się do depolimeryzacji frakcji hemiceluloz w wyniku selektywnej hydrolizy wiązań glikozydowych i grup acetylowych. Jony H_3O^+ pochodzące z jonizacji kwasu octowego, uwolnionego w wyniku procesu hydrolizy frakcji hemiceluloz, umożliwiają destrukcję wiązań eterowych obecnych we frakcji lignin.

Jakkolwiek zastosowanie mieszaniny reakcyjnej w postaci gliceryny i wody (80% wag. gliceryny + 20% wag. wody) w dalszym ciągu nie doprowadziło do efektywnego rozbicia kompleksu lignocelulozowego. W związku z powyższym, w dalszych etapach podjąłem próbę przeprowadzenia procesu obróbki biomasy, wprowadzając dodatkowe czynniki dezintegrujące w postaci kwasu siarkowego (80% wag. frakcji gliceryny/20% wag. wody + 1,0-1,5% wag. H_2SO_4) **[I.B.8]** oraz wodorotlenku sodu (80% wag. frakcji gliceryny/20% wag. wody + 1-3% wag. NaOH) **[I.B.7]**.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnej obróbki traw energetycznych z zastosowaniem gliceryny w warunkach kwasowych wykazałem, że **[I.B.8]**:

- najwyższy stopień hydrolizy hemicelulozy do ksylozy (30% początkowej frakcji hemicelulozy) uzyskano po wstępnej obróbce z zastosowaniem gliceryny w warunkach kwasowych (80% wag. gliceryny + 1,25% wag. H₂SO₄);
- najwyższe stopnie solubilizacji lignin odnotowano w warunkach kwasowych (80% wag. gliceryny + 1.0-1.25% wag. H₂SO₄) i wyniosły one odpowiednio 40% w obecności 1,0% wag. H₂SO₄ i 60% dla 1,25% wag. H₂SO₄). Obniżono zawartość lignin w biomase przetworzonej do poziomu uważanego za korzystny dla procesu hydrolizy enzymatycznej (Chang i Holtzaple, 2000, Novo i in., 2011).

Udokumentowałem, iż wstępna obróbka biomasy lignocelulozowej (na przykładzie konopi przemysłowych) w warunkach alkalicznych umożliwiła **[I.B.7.]**:

- odzysk ok. 40% lignin z użyciem 80% wag. gliceryny i 2-3% wag. NaOH;
- stopień hydrolizy hemicelulozy do ksylozy na poziomie 30% (początkowej frakcji hemicelulozy) w obecności 80% wag. gliceryny i 1-2% wag. NaOH.

Ponadto:

- Nie zaobserwowano negatywnego wpływu zwiększenia udziału biomasy poddawanej obróbce z 10% wag. do 12,5% wag. na stopień hydrolizy frakcji hemiceluloz i usunięcia frakcji lignin. Jednak dalszy wzrost zawartości biomasy w mieszaninie reakcyjnej był związany ze znacznymi stratami cukrów oraz obniżeniem stopnia solubilizacji lignin, a tym samym efektywności procesu.

Tak więc ten etap badań umożliwił mi opracowanie efektywnych metod wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej, zapewniających skuteczne frakcjonowanie komponentów biomasy oraz minimalizujących straty cukrów i nie prowadzących do generowania produktów ubocznych procesu hydrolizy. Po zastosowaniu metod opartych na zastosowaniu gliceryny w warunkach kwasowych ($\leq 1,25\%$ wag. H₂SO₄) (biomasa miskanta olbrzymiego) oraz alkalicznych (2% wag. NaOH) (biomasa konopi przemysłowych) odnotowano ponad dwa razy mniejsze straty cukrów (głównie C5), w porównaniu do ich strat poniesionych w trakcie zastosowania metod termicznych w warunkach kwasowych (H₂SO₄) lub zasadowych (NaOH). **[I.B.7., I.B.8.]**.

Biomasę po przeróbce wstępnej poddano hydrolizie enzymatycznej z zastosowaniem preparatu Cellic® CTec2. Uzyskane w tych warunkach stopnie hydrolizy glukozy (84-90%) kształtowały się w porównywalnym zakresie do wartości otrzymanych w trakcie prób hydrolizy substratów po obróbce alkalicznej (NaOH) oraz metodą utleniania (H₂O₂) **[I.B.2.]**. Natomiast biorąc pod uwagę fakt, iż metody wstępnej obróbki oparte na zastosowaniu gliceryny nie były skuteczne w solubilizacji frakcji hemiceluloz w porównaniu do metod termiczno-kwasowych, podjąłem próbę zwiększenia ich stopnia hydrolizy, poprzez dodatek do preparatu

enzymatycznego składnika Cellic® HTec2 (enzym zasobny w endoksyłanazy). Obecność w preparacie enzymatycznym endoksyłanaz skutkowała tym, że stopień hydrolizy frakcji hemiceluloz obecnych w biomasie konopi przemysłowych, po ich obróbce z gliceryną w warunkach alkalicznych (80% wag. gliceryny i 2% wag. NaOH), wzrósł o ponad 10% w porównaniu z uzyskanym w procesie katalizowanym wyłącznie przez Cellic® CTec2 [I.B.7.].

Ten fakt skłonił mnie do wyznaczenia wpływu różnych mieszanin enzymów hydrolitycznych na efektywność konwersji celulozy i hemicelulozy - odpowiednio do glukozy i ksylozy. Badania zrealizowałem we współpracy z dr inż. Katarzyną Dąbkowską z Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechniki Warszawskiej. W pierwszej kolejności biomasę po obróbce z zastosowaniem gliceryny poddano działaniu następujących preparatów enzymatycznych: Cellic® CTec2, Viscozyme® L, Carezyme 1000L® i β -glukanazy (dawka 15% wag. wyrażona jako procent suchej masy substratu) [I.B.8.]. Dawka została ustalona podczas badań, których wyniki opisałem w pracy [I.B.6.]. Biomasę poddano hydrolizie mieszaniną dwóch preparatów enzymatycznych (tj. Cellic® CTec2 i β -glukanazy), które jak się okazało zapewniły najwyższe stopnie hydrolizy celulozy do glukozy i hemicelulozy do ksylozy. Zastosowano odpowiednie ich proporcje (% wag.): 10 i 5%; 7,5 i 7,5% oraz 5 i 10%. W ostatnim etapie badań mieszaninę enzymatyczną: Cellic® CTec2 (10%) i β -glukanaza (5%) uzupełniono o trzeci enzym, zasobny w endoksyłanazy: Cellic® HTec2 (dawka 1 lub 2% jako procent wagowy suchej masy substratu). Uzyskane wyniki badań poddałem analizie statystycznej. Ten eksperyment doprowadził mnie do następujących wniosków [I.B.8.]:

- ze wszystkich analizowanych preparatów enzymatycznych, najwyższe wartości konwersji celulozy do glukozy (79%) osiągnięto po zastosowaniu Cellic® CTec2. Zastosowanie β -glukanazy skutkowało najwyższymi stopniami hydrolizy ksylozy (68%);
- zastosowanie mieszanin enzymów Cellic® CTec2 (10%) i β -glukanaza (5%) skutkowało o około 7-8% wyższymi stopniami hydrolizy glukozy w porównaniu z preparatem Cellic® CTec2 (15%). Dodatek β -glukanazy nie wpłynął na poprawę stopnia hydrolizy ksylozy;
- niezależnie od wielkości dawki Cellic® HTec2 (1% wag. lub 2% wag.), dodanie trzeciego preparatu enzymatycznego (Cellic® HTec2) miało pozytywny wpływ zarówno na przebieg reakcji enzymatycznych, jak również na końcową efektywność scukrzania.

Zaprezentowane powyżej badania dotyczące zastosowania mieszanin różnych preparatów enzymatycznych (dostępnych handlowo) stanowią nowatorskie podejście do prowadzenia procesu scukrzania biomasy lignocelulozowej. W dalszej kolejności wykonałem bilanse frakcji celulozy i hemicelulozy, w celu wyznaczenia sumarycznych efektywności hydrolizy glukozy i ksylozy (wstępna obróbka + hydroliza enzymatyczna). Dla mieszaniny enzymatycznej

składającej się z Cellic® CTec2 (10%)/β-glukanaza(5%)/Cellic® HTec2 (1-2%) osiągnięto najwyższe sumaryczne stopnie konwersji cukrów fermentujących w odniesieniu do zastosowania pojedynczych enzymów oraz pozostałych testowanych mieszanek preparatów enzymatycznych. Wyniki przedmiotowych badań zaprezentowałem w formie wystąpienia ustnego na Międzynarodowej Konferencji Elsevier “2nd International Conference on Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability [III.B.1] oraz Środkowoeuropejskiej Konferencji ECOpole’18 [III.B.4.]. Zostały one również opublikowane w formie streszczenia konferencyjnego [II.E.27] oraz publikacji naukowej w czasopiśmie *Bioresource Technology* [I.B.8.].

Ad. 2). Przebieg i efektywność fermentacji alkoholowej uzyskanych hydrolizatów oraz procesy odzysku ksylozy z pozostałości po fermentacji

Hydrolizaty uzyskane w procesach wstępnej obróbki wybranej biomasy lignocelulozowej i hydrolizy enzymatycznej w warunkach uznanych za najkorzystniejsze zostały poddane fermentacji alkoholowej. Do procesu wytwarzania etanolu użyto drożdży *S. cerevisiae* (3-5% wag. zaszczip). Fermentację prowadzono w warunkach statycznych, a próby fermentacyjne uzupełniono substancjami mineralnymi stymulującymi procesy fermentacyjne. Badania fermentacji alkoholowej biomasy konopi przemysłowych [I.B.1., I.B.3] przeprowadziłem w ramach staży naukowych w jednostce duńskiej (DTU Environment), natomiast fermentację pozostałych substratów (miskant olbrzymi, słoma rzepakowa) podczas badań w jednostce macierzystej (Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej).

Wyniki badań pozwoliły wnioskować, że proces fermentacji przebiegał efektywnie bez ewidentnej „lag fazy – aklimatyzacja drożdży”. Efektywność produkcji bioetanolu kształtowała się od 73-93% (0,37-0,47g-etanolu/glukoza), w tym przypadku dla hydrolizatów po wstępnej obróbce w warunkach uznanych za najkorzystniejsze, w odniesieniu do analizowanej biomasy (1,0-1,5% wag. H₂SO₄), efektywność procesu wyniosła 83-93% [I.B.1., I.B.3., I.B.4., I.B.6]. Efektywność produkcji bioetanolu po obróbce z zastosowaniem wody utlenionej osiągnęła poziom 84-87% [I.B.3.], a po zastosowaniu gliceryny jako czynnika dezintegrującego kompleks lignocelulozowy 90-92% [I.B.4, I.B.7.].

Najintensywniejszą produkcję bioetanolu zaobserwowano w ciągu pierwszych 24 godzin fermentacji, jednak w ciągu kolejnych 24 godzin procesu uzyskano obniżenie stężenia etanolu, co zostało przypisane katabolicznemu jego utlenieniu będącego wynikiem niskich stężeń glukozy lub procesom jego odparowania podczas fermentacji (Lu i in., 2011, Ruiz i in., 2008). Wykazałem, że stężenie ksylozy nie uległo znaczącym zmianom w trakcie fermentacji, co nie

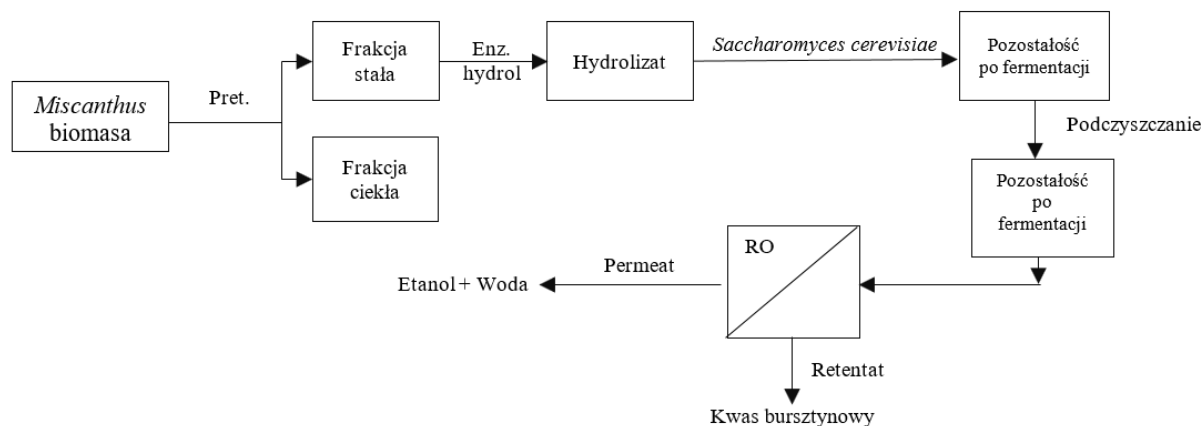
było zaskoczeniem w związku z faktem, iż drożdże nie poddawane modyfikacjom genetycznym - nie przyswajają cukrów C5. Podczas stażu dydaktyczno-naukowego w jednostce DTU Environment [III.L.1.] uczestniczyłem w cyklu badań nt. „Wykorzystania mikroorganizmów termofilnych do wytwarzania etanolu z roztworów ksylozy”. Jakkolwiek w ramach przedmiotowego osiągnięcia naukowego przedstawiłem rozwiązanie bazujące na wykorzystaniu zasobnych w cukry C5 pozostałości po produkcji etanolu lignocelulozowego do produkcji kwasu bursztynowego [I.B.3., I.B.4., I.B.6., I.B.7.]. Wśród wielu szczepów bakterii zdolnych do wytwarzania kwasu bursztynowego poprzez fermentację, szczep *Actinobacillus succinogenes* ze względu na jego zdolność fermentacji szerokiego zakresu źródeł węgla (glukoza, ksyloza, arabinoza, galaktoza itp.) jest uważany za jeden z najbardziej obiecujących do zastosowań przemysłowych (Cheng i in., 2012, Gunnarsson i in., 2014).

W związku z powyższym, w kolejnym etapie badań podjąłem próbę rozdzielenia etanolu od ksylozy (pozostałości cukrów C5 po fermentacji alkoholowej). W tym celu przeprowadziłem ciśnieniową filtrację z zastosowaniem membrany nanofiltrycyjnej DK (150-300 Da) oraz osmotycznej SW30XLE (100 Da). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdziłem, że [I.B.4.]:

- etanol nie był zatrzymywany przez membranę nanofiltrycyjną i osmotyczną. Współczynnik dyfuzji etanolu ($D = 12 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$) jest znacząco większy w porównaniu ze zdolnościami dyfuzyjnymi ksylozy ($D = 7,69 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$) (Xiong i in., 2015), co korzystnie wpłynęło na jego odzysk w permeacie. Rezultat ten był również podyktowany małą masą cząsteczkową alkoholu (46,07 g/mol) i faktem, że stałe dysocjacji cukrów wynoszą powyżej 12 (Xiong i in., 2015), a zatem ksyloza w roztworze o tak niskim odczynie (pH cieczy po fermentacji alkoholowej ok. 4,5) znajdowała się w stanie niezdysojowanym a mechanizm sitowy w trakcie transportu przez membranę, prawdopodobnie odegrał najistotniejszą rolę w rozdzieleniu mieszanin etanol/ksyloza;
- Stosując membranę DK, stopień retencji ksylozy był oczywiście niższy i wyniósł 60%, co umożliwiło osiągnięcie ponad 2,5 większego stężenia ksylozy w porównaniu z roztworem zasilającym (nadawą). Podczas zastosowania membrany SW30XLE wyniósł on ponad 99%, a uzyskany retentat zawierał ponad 6 razy większe stężenie cukru w porównaniu z jego zawartością w pozostałości po wytworzeniu etanolu.

Ten etap badań zrealizowałem podczas stażu na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechniki Śląskiej [III.L.6.]. W ramach przeprowadzonych badań określiłem również wpływ warunków i parametrów operacyjnych procesu membranowego na wielkość objętościowego strumienia permeatu. Opracowana koncepcja produkcji etanolu lignocelulozowego wraz z odzyskiem ksylozy z pozostałości pofermentacyjnych została

przedstawiona w pracy [I.B.4.] (Rys. 1). Zaproponowałem w niej, iż dalszy rozwój przedstawionej technologii odzysku cukrów C5 powinien sprowadzać się do wprowadzenia procesu wstępnego podczyszczania pozostałości pofermentacyjnych. Wpłynęłoby to zdecydowanie na zwiększenie wydajności procesu membranowego.



Rys. 1. Koncepcja wytwarzania etanolu lignocelulozowego wraz z membranowym odzyskiem ksylozy z pozostałości pofermentacyjnych, na podstawie [I.B.4.]

Uzyskane wyniki badań zaprezentowałem podczas Międzynarodowej Konferencji Desalination for the Environment: Clean Water and Energy [III.B.8.] oraz zostały opublikowane w formie streszczenia konferencyjnego [II.E.30.] i w formie rozszerzonej w czasopiśmie Desalination and Water Treatment [I.B.4.]. Opracowana koncepcja odzysku ksylozy po procesie fermentacji alkoholowej została również zastosowana do separacji pozostałości po produkcji etanolu ze słomy rzepakowej [I.B.6.].

Ad. 3) Przebieg i efektywność wytwarzania kwasu bursztynowego z uzyskanych hydrolizatów i pozostałości po fermentacji alkoholowej

Jak wiadomo efektywna destrukcja kompleksu lignocelulozowego połączona z enzymatyczną hydrolizą, skutkuje uzyskaniem substratu zasobnego zarówno w cukry pięciowęglowe - C5 (pochodzące z rozkładu hemicelulozy), jak i sześciowęglowe - C6 (pochodzące z rozkładu celulozy) stanowiące wartościowy substrat do produkcji bioproduktów, m.in. kwasu bursztynowego. W ramach przeprowadzonych badań, fermentacji poddałem następujące roztwory:

- hydrolizaty pochodzące z wstępnie przetworzonej biomasy (konopie przemysłowe) z zastosowaniem czynnika utleniającego (3% H₂O₂) i (Celluclast 1.5 L/Novozyme 188) [I.B.2], traw energetycznych przetworzonych metodą z zastosowaniem gliceryny

w warunkach kwasowych (1,25% H₂SO₄) i (Cellic® CTec2/β-Glucanase/Cellic® HTec2) **[I.B.8.]**;

- mieszaniny hydrolizatów (Celluclast 1.5 L/Novozyme 188) i frakcji ciekłych po obróbce biomasy konopi przemysłowych **[I.B.2]** i traw energetycznych **[I.B.5.]** metodą termiczno-kwasową (1,0-1,5% wag. H₂SO₄);
- frakcje ciekłe po obróbce konopi przemysłowych **[I.B.3]** i słomy rzepakowej **[I.B.6.]** metodą termiczno-kwasową (1,0-1,5% H₂SO₄) oraz
- retentaty uzyskane podczas opracowanej przeze mnie koncepcji odzysku ksylozy **[I.B.4.]** z pozostałości po produkcji etanolu lignocelulozowego z konopi przemysłowych **[I.B.3, I.B.7.]** i słomy rzepakowej **[I.B.4., I.B.6.]**.

Celem naukowym przeprowadzonych przeze mnie badań na tym etapie było określenie **[I.B.2, I.B.3., I.B.4., I.B.5., I.B.6., I.B.7., I.B.8.]**:

- wpływu rodzaju hydrolizatów otrzymanych w procesach hydrolizy biomasy lignocelulozowej na efektywność i przebieg procesu powstawania kwasu bursztynowego z zastosowaniem szczepu *A. succinogenes*;
- wpływu rodzaju fermentowanych substratów (hydrolizaty, frakcje ciekłe po obróbce biomasy, odseparowana frakcja cukrów C5 z pozostałości po fermentacji alkoholowej) na efektywność i przebieg procesu powstawania kwasu bursztynowego;
- wpływu rozcieńczenia fermentowanych substratów oraz suplementacji substancjami wspomagającymi procesy biotechnologiczne na efektywność procesu powstawania kwasu bursztynowego;
- wpływu rodzaju fermentowanych substratów oraz zastosowanych warunków procesu fermentacji na ilość generowanych produktów ubocznych (kwas octowy, mrówkowy, mlekowy lub etanol), powstających podczas wytwarzania kwasu bursztynowego przy użyciu *A. succinogenes* oraz
- wyznaczenie wpływu zastosowania alternatywnych substratów (wytłoki makuchove), jako źródła azotu - na przebieg i efektywność wytwarzania kwasu bursztynowego przy użyciu *A. succinogenes*.

W pierwszej kolejności, jako substraty procesów fermentacji zastosowałem mieszaniny hydrolizatów i frakcji ciekłych po wstępnej obróbce biomasy konopi przemysłowych metodą termiczno-kwasową (1,0-1,5% wag. H₂SO₄) oraz hydrolizaty otrzymane po obróbce biomasy wstępnie przetworzonej z zastosowaniem czynnika utleniającego (3% H₂O₂). W przypadku obróbki metodą utleniającą, frakcje ciekłe po tej obróbce nie zostały zmieszane z hydrolizatami, z uwagi na małe stężenie cukrów fermentujących, co stanowiło podstawową wadę tych metod **[I.B.2.]**. Celem naukowym tego eksperymentu było ustalenie ilości dozowanej

pożywki (substancje mineralne + źródło azotu) do mieszanin poddawanych fermentacji na przebieg i efektywność procesu produkcji kwasu bursztynowego. Uwzględniono w nim następujące proporcje substratów do pożywki (% obj.): 100:0; 75:25; 50:50; 25:75 [I.B.2.]. Przeprowadzone badania pozwoliły mi na wyciągnięcie następujących wniosków:

- fermentacja hydrolizatów bez dodatku substancji wspomagających proces fermentacji, skutkowała niskim stopniem konwersji polisacharydów do produktów końcowych fermentacji (< 43%), co wskazuje, że źródło azotu (ekstrakt drożdżowy) i substancje mineralne stanowią czynnik wpływający w znaczący sposób na przebieg analizowanych procesów. Niska efektywność produkcji kwasu bursztynowego w procesie fermentacji bez dodatku substancji wspomagających (rozcieńczenia) została również potwierdzona podczas badań opisanych w pracy [I.B.3.];
- najwyższe efektywności produkcji kwasu bursztynowego (> 78%) uzyskano dla najbardziej rozcieńczonych substratów, tj. mieszanin zawierających 75% substancji wspomagających fermentację. Wraz ze wzrostem zawartości cukrów (w mieszaninach poddawanych fermentacji) zaobserwowano obniżenie stężenia produkowanego kwasu bursztynowego. W pracy dotyczącej fermentacji hydrolizatów pochodzących z obróbki biomasy traw energetycznych metodą termiczno-kwasową (1,5% wag. H₂SO₄) [I.B.5.], efektywność produkcji kwasu bursztynowego wyniosła 73%;
- zaobserwowano szybszy wzrost *A. succinogenes* oraz osiągnięcie jego maksimum wzrostu również dla najbardziej rozcieńczonych substratów. Jednak jak można było się spodziewać, fermentacja roztworów zawierających mniejsze stężenia cukrów fermentujących, skutkowała mniejszym stężeniem produktów finalnych;
- zaobserwowano symultaniczną konwersję glukozy i ksylozy w produkty fermentacji (kwas organiczne). Jakkolwiek dla mniejszego od 25% udziału pożywki w mieszaninie poddawanej fermentacji, znacząca część początkowej zawartości ksylozy wciąż była obecna w roztworze;
- stwierdzono, iż rodzaj wstępnej obróbki nie wpłynął w znaczący sposób na efektywność fermentacji kwasu bursztynowego, a najwyższa efektywność została osiągnięta dla hydrolizatów po obróbce metodą utleniającą i była ona związana z wyższym stężeniem cukrów w porównaniu do hydrolizatów po wstępnej obróbce metodą termiczno-kwasową oraz
- w zależności od warunków fermentacji, inne metabolity (kwas octowy, mrówkowy, kwas mlekowy lub etanol) są wytwarzane podczas fermentacji kwasu bursztynowego (Pateraki i in., 2016). W trakcie przedmiotowych badań kwas octowy i mrówkowy stanowiły główne produkty uboczne powstające podczas fermentacji.

Omówione powyżej badania przeprowadziłem podczas stażu w jednostce DTU Environment [III.L.4.]. Uzyskane wyniki badań opublikowałem w czasopiśmie *Bioresource Technology* wraz z doktorantem odpowiedzialnym za fermentację kwasu bursztynowego w warunkach statycznych. Mój udział w badaniach opisanych w tym artykule sprowadzał się do przeprowadzenia wstępnej obróbki biomasy oraz przeprowadzeniu fermentacji w większej skali (reaktory) [I.B.2.].

Zagadnienie wpływu stopnia rozcieńczenia substratu oraz udziału substancji wspomagających procesy fermentacyjne stanowiły również przedmiot moich dalszych eksperymentów badawczych. Fermentacji poddałem retentaty osmotyczne zawierające ksylozę [I.B.3.]. Badania te wykonałem już w jednostce macierzystej (Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej), korzystając z wcześniej zdobytego doświadczenia na stażach naukowych odbytych w jednostce DTU Environment [III.L.4., III.L.5.]. Ustaliłem, iż proces fermentacji zachodził z efektywnością 79–82% (0,79–0,82 g kwasu bursztynowego/g cukrów fermentujących) w warunkach kontrolowanych, w przypadku fermentacji frakcji ciekłych (po obróbce metodą termiczno-kwasową) i po wzbogaceniu (rozcieńczeniu) mieszaniny fermentacyjnej w co najmniej 25% obj. pożywką wspomagającą prowadzony proces. Podczas, gdy fermentacja pozostałości po oddestylowaniu etanolu nie wymagała rozcieńczenia oraz dodatku substancji wspomagających proces fermentacji kwasu bursztynowego. Jednak należy podkreślić, iż substancje mineralne i ekstrakt drożdżowy (jako źródło azotu) zostały w tym przypadku dodane już przed fermentacją alkoholową.

W trakcie badań laboratoryjnych produkcji kwasu bursztynowego z frakcji ciekłych po obróbce słomy rzepakowej metodą termiczno-chemiczną (1,0% wag. H_2SO_4) oraz z retentatów uzyskanych z pozostałości po odseparowaniu etanolu, przeanalizowałem następujące proporcje substratów do pożywki (% obj.): 100:0; 80:20; 60:40. Na podstawie przeprowadzonych analiz również stwierdziłem, iż proces fermentacji frakcji ciekłych po obróbce biomasy zachodził efektywnie, tj. stopień konwersji cukrów do kwasu bursztynowego wynosił 60–61% (0,60–0,61 g kwasu bursztynowego/g cukrów fermentujących), a stopień konwersji cukrów 81–84% - dla mieszanin zawierających przynajmniej 20% obj. udziału pożywki, wspomagającej procesy fermentacyjne. Wykazałem, że wytwarzanie kwasu bursztynowego w wyniku fermentacji pozostałości (ksyloza) po odseparowaniu etanolu również w tym przypadku nie wymagało dodatku substancji wspomagających procesy fermentacyjne. Nie odnotowano wpływu warunków prowadzenia procesu hydrolizy enzymatycznej (rodzaj zastosowanych enzymów) na efektywność procesu wytwarzania kwasów karboksylowych. Ustalono, iż efektywność procesu fermentacji w największym stopniu była uzależniona od rodzaju fermentowanych cukrów, tj. glukozy lub ksylozy. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie naukowym

Bioresource Technology [I.B.6.]. Wyznaczone najkorzystniejsze rozcieńczenie fermentowanych substratów oraz udział pożywki wspomagającej procesy fermentacyjne (20-25% obj. fermentowanych mieszanin), zostały także zastosowane w dalszych badaniach poświęconych produkcji kwasu bursztynowego z substratów lignocelulozowych i opisanych w kolejnych artykułach [I.B.7, I.B.8]. W pracach tych uzyskano efektywność produkcji kwasu bursztynowego na poziomie 82% dla hydrolizatów (0,82 g kwasu bursztynowego/g cukrów fermentujących) oraz 59-64% (0,59-0,64 g kwasu bursztynowego/g cukrów fermentujących) dla pozostałości po fermentacji alkoholowej (ksyloza). Uzyskana wyższa efektywność procesu fermentacji hydrolizatów wynikała z obecności glukozy, która w tym układzie była składnikiem dominującym, a konwersja glukozy przez *A. succinogenes* zachodzi z wyższą efektywnością w porównaniu z ksylozą (cukrami C5) (Salvachua i in., 2016, Pateraki i in., 2016.). Zostało to również zaobserwowane w kolejnych badaniach przedstawionych w publikacji [I.B.3.].

Ostatnie zagadnienie naukowe jakie było w kręgu moich zainteresowań dotyczyło zbadania wpływu zastosowania alternatywnych substratów (wytłoki makuchowe), jako źródło azotu, podczas wytwarzania kwasu bursztynowego przy użyciu *A. succinogenes*. Podczas badań wyznaczyłem wpływ zastosowania wytlóków makuchowych na efektywność produkcji kwasu bursztynowego oraz przebieg procesów fermentacyjnych, w tym generowanie produktów ubocznych fermentacji. Podjąłem próbę możliwości zastąpienia lub ograniczenia dawki ekstraktu drożdżowego stosowanego powszechnie w dotychczasowej technologii biochemicznej. Ekstrakt drożdżowy, bogaty w aminokwasy, witaminy i mikroelementy jest uważany za korzystne źródło azotu w procesach fermentacyjnych. Ekstrakt jest jednak komponentem, który w znaczący sposób wpływa na wyraźne zwiększenie kosztu procesu fermentacji. W tej sytuacji jego zastąpienie innymi alternatywnymi substratami niewątpliwie obniżyłoby koszty produkcji kwasu bursztynowego z biomasy lignocelulozowej. W eksperymencie jako alternatywne źródło azotu wykorzystałem ekstrakt drożdżowy i/lub makuchy rzepakowe (odpad powstający podczas tłoczenia oleju z rzepaku). Fermentację kwasu bursztynowego przeprowadzono z zastosowaniem następujących proporcji ekstraktu drożdżowego i makuchu rzepakowego (% wag.): 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 i 0:100 [I.B.7.]. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że [I.B.7.]:

- celowym byłoby zastąpienie 50% ekstraktu drożdżowego makuchem rzepakowym bez znaczącego pogorszenia stopnia konwersji cukrów i efektywności produkcji kwasu bursztynowego. Jednak złożony skład makuchu wymaga przeprowadzenia dalszych badań pozwalających potwierdzić który ze składników (azotu organicznego) miał najistotniejszy wpływ na wydajność produkcji kwasu bursztynowego i pozostałych metabolitów procesu;

- wprowadzenie makuchu rzepakowego jako jedyne źródło azotu skutkowało niską efektywnością procesu oraz statystycznie większym obciążeniem polisacharydami pozostałości pofermentacyjnych w odniesieniu do pozostałych prób zawierających ekstrakt drożdżowy.

Ad 4). Procesy odzysku kwasu bursztynowego z pozostałości pofermentacyjnych

Procesy oczyszczania cieczy pofermentacyjnych oraz odzysku wysokiej czystości kwasu bursztynowego jako finalnego produktu mogą stanowić nawet 50-60% całkowitych kosztów produkcji tego kwasu metodami biotechnologicznymi (Li i in., 2016). Biorąc pod uwagę technologię wytwarzania kwasu bursztynowego z użyciem *A. succinogenes* (pH = 6,8-7,0), powstałymi metabolitami procesu są: octany, mrówczany, nieznaczące ilości mleczanów [I.B.2., I.B.3., I.B.4., I.B.5., I.B.6., I.B.7., I.B.8]. Tradycyjne metody odzysku kwasu bursztynowego opierają się na wytrącaniu nierozpuszczalnych soli wapniowych kwasu bursztynowego, które odseparowuje się od roztworu na drodze filtracji. Kwas bursztynowy jest następnie odzyskiwany poprzez dodanie kwasu siarkowego. Główną wadą tej metody jest powstawanie znacznych ilości zanieczyszczonego siarczanu wapnia (Cao i in., 2013).

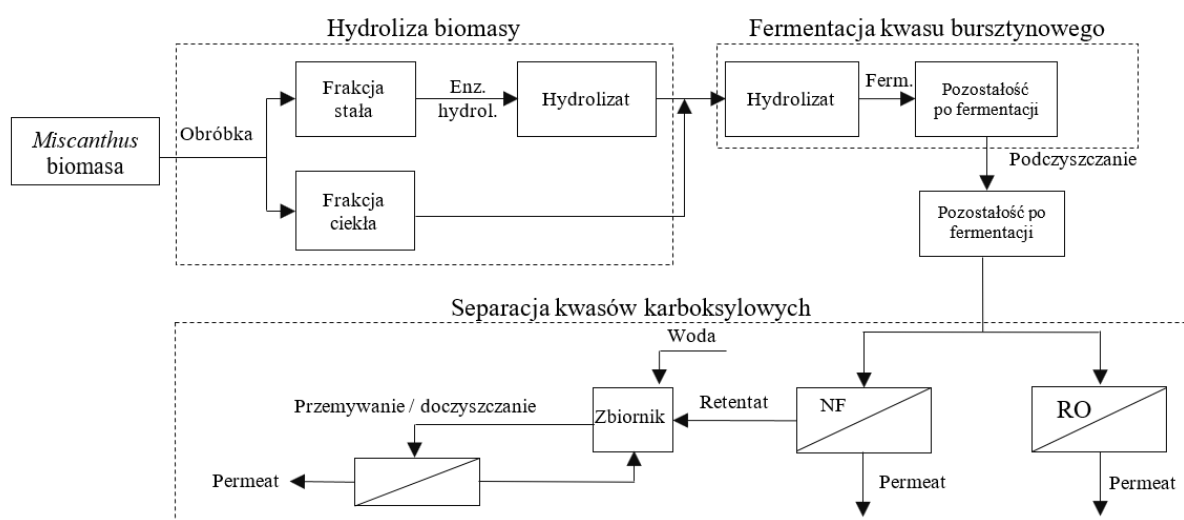
Obecnie w kręgu zainteresowań wielu ośrodków naukowych znalazły się ciśnieniowe techniki membranowe, umożliwiające rozdzielanie składników cieczy pofermentacyjnych. Kwasy organiczne mogą być skutecznie zatrzymywane lub transportowane przez membrany, w przypadku zapewnienia odpowiedniego odczynu filtrowanych wód pofermentacyjnych. W związku z tym, celem kolejnego etapu eksperymentu było zbadanie możliwości odzysku kwasów organicznych (bursztynowy, octowy, mrówkowy) i/lub ich soli (bursztynian, octan, mrówczan), dzięki zastosowaniu odpowiednio dobranych membran oraz wyznaczenie właściwego odczynu roztworu pofermentacyjnego (pH 3,0, 6,8-7,0 i 8,5). Filtrację roztworów po fermentacji kwasu bursztynowego przeprowadzono z zastosowaniem membrany osmotycznej (SW30XLEM) oraz nanofiltracyjnej (DK) [I.B.5.]. Założonym celem filtracji było zatrzymanie w retencji kwasu bursztynowego lub bursztynianu (główny produkt fermentacji) oraz usunięcie w permeacie kwasu octowego i mrówkowego lub ich soli. Przeprowadzone badania wykazały, że [I.B.5.]:

- w przypadku membrany SW30XLE i niskiego odczynu nadawy wynoszącego ok. 3,0 retencja kwasu bursztynowego (MW: 118 Da), którego rozmiary cząstek są większe od wielkości porów membrany wyniosła > 88%. Natomiast w tych warunkach zatrzymano również 8-10% kwasu octowego (MW = 60 Da) i mrówkowego (MW = 46 Da). Biorąc

pod uwagę, fakt braku znacznej różnicy w wartościach współczynników dyfuzyjności pomiędzy przedmiotowymi kwasami, efekt transportu sitowego przez tą membranę uznano za główne kryterium odpowiedzialne za rozdzielenie niezdysocjowanych kwasów. Naturalny odczyn cieczy pofermentacyjnej ($\text{pH} = 6,8-7,0$) oraz jej pH na poziomie ok. 8,5 zapewniły wzrost retencji wszystkich analizowanych kwasów karboksylowych;

- dla membrany (DK) najwyższy stopień retencji kwasu bursztynowego (81%) odnotowano dla naturalnego odczynu wód pofermentacyjnych. Dla filtracji (membrana DK) w zakresie odczynu 8,5 odnotowano obniżenie stopnia retencji kwasów karboksylowych, co można wytłumaczyć faktem, iż wysokie stężenie jonów w wyniku korekty odczynu nadawy osłabiło mechanizm odpychania elektrostatycznego i spowodowało obniżenie retencji ujemnie naładowanych jonów kwasów karboksylowych (Xiong i in., 2015).

Dalszą część eksperymentu poświęciłem doczyszczaniu otrzymanego koncentratu (po nanofiltracji, $\text{pH} 6,8-7,0$) oraz zateżaniu kwasu bursztynowego. Filtrację koncentratu nanofiltracyjnego prowadziłem w systemie diafiltracji. W końcowym etapie kwas bursztynowy stanowił 95% wszystkich kwasów obecnych w roztworze. Opracowaną koncepcję odzysku kwasu bursztynowego na drodze filtracji membranowej przedstawiłem na poniższym rysunku. Koncepcję tą zaprezentowałem na Międzynarodowej Konferencji “Desalination for the Environment: Clean Water and Energy”, 2016 [III.B.9.]. Wyniki badań w formie rozszerzonej zostały również opublikowane w czasopiśmie naukowym Desalination and Water Treatment [I.B.5.].



Rys. 2. Koncepcja produkcji kwasów karboksylowych z hydrolizatów po obróbce traw energetycznych i zintegrowana z odzyskiem kwasu bursztynowego na drodze filtracji membranowej [I.B.5.].

Przedstawione powyżej wyniki badań i zaprezentowane w osiągnięciu naukowym **[I.B.5.]** stanowią część większego projektu, którego celem jest opracowanie efektywnych metod oczyszczania cieczy pofermentacyjnych oraz odzysku kwasu bursztynowego o stopniu czystości (98-99%) i zapewniającym możliwość jego zastosowania w formie substratu w procesach wytwarzania różnych wartościowych produktów końcowych (m.in. polimerów). Obecnie kieruję pracami obejmującymi różne układy procesów zintegrowanych, umożliwiających oczyszczanie cieczy pofermentacyjnych oraz odzysk kwasu bursztynowego o wysokim stopniu czystości. Należą do nich: bezpośrednia krystalizacja z zakwaszaniem i destylacją próżniową (metoda 1), wymiana jonowa na żywicy kationowymiennej (Amberlite IR 120H), a następnie destylacja próżniowa i krystalizacja (metoda 2) oraz membranowa filtracja z krystalizacją (metoda 3) **[II.J.1.]**.

W ramach ostatniego osiągnięcia naukowego **[I.B.8.]**, ciecz pofermentacyjna po procesach podczyszczania (odwirowanie biomasy, ultrafiltracja) została skierowana na kolumny jonowymienne z żywicą kationowymienną (Amberlite IR 120H), a następnie ciecz ta została poddana destylacji próżniowej i krystalizacji (metoda 2). Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdziłem, że:

- wstępne podczyszczenie cieczy pofermentacyjnych w procesie ultrafiltracji i przefiltrowaniu przez żywicę kationowymienną pozwoliło na przekształcenie soli kwasu bursztynowego w kwas bursztynowy. Uzyskany stopień konwersji wynosił 75%, a straty procesu kształtowały się na poziomie 18%;
- filtrat po wymianie jonowymiennej został poddany destylacji próżniowej, co pozwoliło na całkowite usunięcie kwasu octowego i mrówkowego. Kwasy te charakteryzują się znacznie niższą temperaturą wrzenia niż kwas bursztynowy i w ten sposób zostają oddestylowane wraz z większością wody (Vlysidis i in., 2011)) oraz
- efektywność krystalizacji zastosowanej jako ostatni z etapów oczyszczania cieczy pofermentacyjnych i odzysku kwasu bursztynowego wyniosła 68%, a czystość uzyskanych kryształów tego kwasu 99%, co umożliwia ich zastosowanie jako substratu w procesach polimeryzacji.

To ostatnie osiągnięcie badawcze zaprezentowałem na Międzynarodowej Konferencji „2nd International Conference on Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability “ w formie wystąpienia ustnego **[II.L.1.]**. Wyniki badań w formie rozszerzonej zostały również opublikowane w czasopiśmie naukowym „Bioresource Technology” **[I.B.8.]**. W najbliższej przyszłości koncepcja oczyszczania cieczy pofermentacyjnych i odzysku

kwasu bursztynowego zostanie rozszerzona o opracowany już wcześniej etap filtracji membranowej [I.B.5].

Podsumowanie

Prace naukowe zaprezentowane w formie monotematycznego cyklu publikacji dotyczą opracowanych przeze mnie efektywnych metod obróbki wstępnej biomasy lignocelulozowej, przed produkcją z niej produktów użytkowych. Nowatorski charakter przedstawionych badań obejmuje jednoczesne wytworzenie w wyniku przeróbki biomasy dwóch głównych produktów użytkowych, tj. **bioetanolu lignocelulozowego i kwasu bursztynowego [I.B.1-I.B.8]**, a generowane odpady z poszczególnych etapów procesu wykorzystane zostały jako substraty w procesach fermentacji metanowej (**produkcja biogazu [I.B.7., I.B.8]**). Koncepcja ta pozwala na wytwarzanie tych produktów z szerokiej gamy substratów dostępnych w warunkach polskich, np. konopi przemysłowych, traw energetycznych oraz odpadów rolniczych [I.B.1-I.B.8]. Wybór biomasy lignocelulozowej (odpadowej oraz upraw celowych) jako materiału badawczego nie jest przypadkowy, gdyż to właśnie biomasa stanowi największe źródło surowców odnawialnych, które mogą posłużyć do wytworzenia energii/wartościowych produktów w naszym kraju. Poza odpadami powstającymi podczas produkcji rolnej, za atrakcyjne źródło biomasy uważane są plantacje roślin energetycznych. Rośliny te uprawiane mogłyby być na terenach wyłączonych z upraw przeznaczonych na produkcję żywności. Zastosowanie natomiast biomasy roślinnej w zaproponowanej lignorafinerii nakierowanej na jak największe wykorzystanie biomasy poprzez produkcje różnych nośników energii (etanol, biogaz) oraz innych produktów o właściwościach użytkowych (m.in. kwas bursztynowy) wydaje się być obiecującym rozwiązaniem, znajdującym odzwierciedlenie w polskich warunkach. Na szczególną uwagę zasługuje opracowana przeze mnie technologia wykorzystania pozostałości po produkcji bioetanolu do wytwarzania wartościowych produktów użytkowych, tj. kwasów karboksylowych.

W ramach omówionych badań rozwiązałem następujące problemy naukowe i technologiczne związane z przetwarzaniem biomasy lignocelulozowej do wartościowych produktów użytkowych [I.B.1-I.B.8]:

- 1) opracowałem metody skutecznej obróbki wstępnej wybranej biomasy lignocelulozowej z zastosowaniem gliceryny jako czynnika dezintegrującego kompleks lignocelulozowy w warunkach kwasowych i zasadowych. Ten sposób obróbki wstępnej biomasy roślinnej zapewnia możliwość efektywnego frakcjonowania komponentów biomasy, minimalizując straty frakcji celulozy i hemicelulozy;

- 2) wyznaczyłem na drodze doświadczalnej, najkorzystniejszy skład mieszaniny preparatów enzymatycznych (Cellic® CTec2/Cellic® HTec2 oraz Cellic® CTec2/ β -glukanazy/Cellic® HTec2), zapewniający wysoki stopień konwersji frakcji celulozy i hemicelulozy do cukrów prostych;
- 3) opracowałem efektywne metody rozdziału pozostałości po produkcji etanolu II generacji oraz ich zagospodarowania w procesie wytwarzania kwasu bursztynowego;
- 4) zaprezentowałem koncepcję wytwarzania kwasu bursztynowego z hydrolizatów biomasy lignocelulozowej i wykazałem możliwość zastąpienia części ekstraktu drożdżowego przez alternatywne źródła związków azotu;
- 5) przedstawiłem koncepcję odzysku kwasu bursztynowego o wysokiej czystości (> 98%).

Opracowane przeze mnie warunki wstępnej obróbki biomasy zapewniły wysoki stopień delignifikacji biomasy, tj. około 40-60% [I.B.7., I.B.8.], co umożliwiło rozwiązanie problemu technologicznego, związanego z koniecznością obniżenia zawartości lignin w biomacie do poziomu (ok. 10% s.m.), uważanego za korzystny dla dalszych procesów przeróbki, czyli hydrolizy enzymatycznej. Podczas wstępnej obróbki biomasy analizowaną metodą z zastosowaniem gliceryny odpadowej po produkcji biodiesla powstają frakcje ciekłe, które po odseparowaniu frakcji lignin mogą ponownie zostać zawrócone do etapu wstępnej obróbki biomasy. W ramach osiągnięcia naukowego [I.B.7., I.B.8.], przedstawiłem alternatywną metodę ich zagospodarowania jako substratu procesu fermentacji metanowej.

Opracowana mieszanina dostępnych komercyjnie preparatów enzymatycznych zapewniająca wysoki stopień hydrolizy cukrów C5 i C6, w przyszłości przyczyni się zapewne do poprawy efektywności ekonomicznej procesu fermentacji, prowadzącej do produkcji wartościowych chemikaliów, w tym kwasu bursztynowego [I.B.8.]. Kwas bursztynowy został uznany za jeden z 10 kluczowych związków chemicznych, które mogą być wykorzystane do syntezy szerokiej gamy cennych produktów, np. pro-ekologicznych rozpuszczalników, polimerów ulegających biodegradacji. Należy również podkreślić, że w trakcie procesu wytwarzania kwasu bursztynowego, bakterie *A. succinogenes* asymilują CO₂ (teoretycznie mol CO₂/ mol wytworzonego kwasu bursztynowego), który dodawany jest m.in. w formie soli węglanowych. Szacuje się, iż wyprodukowanie 1 tony kwasu bursztynowego na drodze biologicznej prowadzi do ograniczenia emisji CO₂ w zakresie 4,5-5 tony w odniesieniu do produkcji tej samej ilości tegoż kwasu metodami chemicznymi (Hermann i in., 2007). Wiadomo natomiast, że podstawowym substratem do produkcji kwasu bursztynowego metodami chemicznymi jest ropa naftowa. Obecnie koncepcja tzw. „**green technology**” staje się siłą napędową w przemyśle chemicznym ze względu na konieczność zmniejszenia negatywnego wpływu przemysłu petrochemicznego na środowisko. W ramach moich dalszych zainteresowań

naukowych zaplanowałem wykorzystanie **odpadowego dwutlenku węgla** do produkcji kwasu bursztynowego na drodze biologicznej, co stanowi innowacyjne podejście na chwilę obecną.

Literatura:

- Cao, Y.J., Zhang, R.B., Sun, C., Cheng, T., Liu, Y.H., Xian, M., 2013. Fermentative Succinate Production: An Emerging Technology to Replace the Traditional Petrochemical Processes. *Biomed Res. Int.*, 723412.
- Chang, V.S., Holtzaple, M.T., 2000. Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84, 5-37.
- Cheng, K.K., Zhao, X.B., Zeng, J., Zhang, J.A., 2012. Biotechnological production of succinic acid: current state and perspectives. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 6, 302-318.
- Gunnarsson, I.B., Alvarado-Morales, M., Angelidaki, I., 2014. Utilization of CO₂ fixating bacterium *Actinobacillus succinogenes* 130Z for simultaneous biogas upgrading and biosuccinic acid production. *Environ. Sci. Technol.* 48, 12464-12468.
- Hermann, B.G., Blok, K., Patel, M.K., 2007. Producing bio-based bulk chemicals using industrial biotechnology saves energy and combats climate change. *Environ. Sci. Technol.* 41, 7915-7921.
- Jung, Y.H., Kim, I.J., Kim, H.K., Kim, K.H., 2013. Dilute acid pretreatment of lignocellulose for whole slurry ethanol fermentation. *Bioresour. Technol.* 132, 109-114.
- Kamireddy, S.R., Li, J.B., Abbina, S., Berti, M., Tucker, M., Ji, Y., 2013. Converting forage sorghum and sunn hemp into biofuels through dilute acid pretreatment. *Ind. Crop Prod.* 49, 598-609.
- Li, Q.Z., Jiang, X.L., Feng, X.J., Wang, J.M., Sun, C., Zhang, H.B., Xian, M., Liu, H.Z., 2016. Recovery Processes of Organic Acids from Fermentation Broths in the Biomass-Based Industry. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 26, 1-8.
- Lu, X., Xi, B., Zhang, Y., Angelidaki, I., 2011. Microwave pretreatment of rape straw for bioethanol production: focus on energy efficiency. *Bioresour. Technol.* 102, 7937-7940.
- Mathew, A.K., Chaney, K., Crook, M., Humphries, A.C., 2011. Dilute acid pre-treatment of oilseed rape straw for bioethanol production. *Renew. Energy* 36, 2424-2432.
- Novo, L.P., Gurgel, L.V.A., Marabezi, K., Curvelo, A.A.D., 2011. Delignification of sugarcane bagasse using glycerol-water mixtures to produce pulps for saccharification. *Bioresour. Technol.* 102, 10040-10046.
- Pateraki, C., Patsalou, M., Vlysidis, A., Kopsahelis, N., Webb, C., Koutinas, A.A., Koutinas, M., 2016. *Actinobacillus succinogenes*: advances on succinic acid production and prospects for development of integrated biorefineries. *Biochem. Eng. J.* 112, 285-303.
- Ruiz, E., Cara, C., Manzanares, P., Ballesteros, M., Castro, E., 2008. Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. *Enzyme Microb. Technol.* 42, 160-166.
- Salvachua, D., Mohagheghi, A., Smith, H., Bradfield, M.F.A., Nicol, W., Black, B.A., Bidy, M.J., Dowe, N., Beckham, G.T., 2016. Succinic acid production on xylose-enriched biorefinery streams by *Actinobacillus succinogenes* in batch fermentation. *Biotechnol. Biofuels* 9, 28.
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D., Osborne, J., 2007. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bioresour. Technol.* 98, 3000-3011.
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Janu, K.U., Sukumaran, R.K., Pandey, A., 2011. Dilute acid pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane tops for bioethanol production. *Bioresour. Technol.* 102, 10915-10921.
- Sun S., Sun S., Cao X., Sun R., 2016. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresour. Technol.* 199, 49-58.

Talebnia, F., Mighani, M., Rahimnejad, M., Angelidaki, I., 2015. Ethanol production from steam exploded rapeseed straw and the process simulation using artificial neural networks. *Biotechnol. Bioprocess. Eng.* 20, 139-147.

Vlysidis, A., Binns, M., Webb, C., Theodoropoulos, C., 2011. A techno-economic analysis of biodiesel biorefineries: assessment of integrated designs for the co-production of fuels and chemicals. *Energy* 36, 4671-4683.

Xiong B., Richard T.L., Kumar M., 2015. Integrated acidogenic digestion and carboxylic acid separation by nanofiltration membranes for the lignocellulosic carboxylate platform. *J. Membr. Sci.*, 489, 275–283.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Źródło cytowanych w opracowaniu odnośników stanowi załącznik_5 pt.: „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

W mojej działalności naukowo-badawczej, niezwiązanej z opisanym wcześniej osiągnięciem, można przede wszystkim wymienić zaangażowanie w zakresie:

- 1) prac badawczych związanych z procesami oczyszczania ścieków komunalnych/przemysłowych, odcieków ze składowisk odpadów komunalnych i przeróbki powstających osadów ściekowych;
- 2) procesów kofermentacji i oczyszczania powstałych wód pofermentacyjnych oraz
- 3) współpracy z otoczeniem społecznym oraz popularyzacji nauki i innowacyjnych rozwiązań.

Ad. 1). Procesy oczyszczania ścieków komunalnych/przemysłowych, odcieków ze składowisk odpadów komunalnych i przeróbki powstających osadów ściekowych

Działalność naukową rozpocząłem na czwartym roku studiów magisterskich (Inżynieria Środowiska). Jako student i dyplomant prof. dr hab. inż. Jana Suschki prowadziłem badania w ramach pracy magisterskiej „Problemy technologiczne oraz ekologiczne w produkcji olejów jadalnych z rzepaku i słonecznika”. Głównym ich celem naukowym było rozwiązanie problemu flotacji osadów na powierzchni ścieków, pochodzących z produkcji olejów jadalnych. Stwierdziłem, iż obecność tłuszczów w znacznych stężeniach przyczynia się do powstawania związków wapniowo-tłuszczowych flotujących ich powierzchnię, co w rezultacie zakłóca proces podczyszczania ścieków. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane na konferencji międzynarodowej ECOpole i opublikowane w pracy [II.E.22.].

Po ukończeniu studiów magisterskich, rozpocząłem studia doktoranckie na Wydziale Infrastruktury i Środowiska (2006-2007) w Politechnice Częstochowskiej, które od drugiego roku kontynuowałem na Wydziale Inżynierii środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach (2007-2010). Tym razem obszarem moich zainteresowań były procesy przeróbki osadów ściekowych, w tym nowe techniki kondycjonowania osadów oraz intensyfikacji procesu stabilizacji osadów ściekowych i odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Wyniki zostały opublikowane w pracach [II.E.11., II.E.16., II.E.20., II.E.21.,

II.E.23., II.E.24., II.E.40., II.E.42.] oraz zaprezentowane na konferencjach i seminariach naukowych [**III.B.17, III.B.19**]. Po zatrudnieniu na stanowisku asystenta w Zakładzie Technologii i Procesów Środowiska (Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej) złożyłem wniosek w ogłoszonym przez Rektora ATH konkursie na grant wewnętrzny i zająłem drugie miejsce wśród wszystkich zgłoszonych aplikacji. Przyznany grant pozwolił mi przeprowadzić badania nt. Odzysk energii oraz utylizacja organicznej frakcji odpadów komunalnych w warunkach beztlenowych [**II.J.2.**], a ich efektem było wyznaczenie wpływu dodatku odpadów komunalnych na efektywność i stabilność procesu fermentacji metanowej w warunkach mezofilowych”. Wyniki badań zostały zaprezentowane w pracach [**II.E.7., II.E.10., II.E.12., II.E.19., II.E.43**]. Zrealizowane badania wpłynęły na moje dalsze zainteresowania naukowe procesami kofermentacji, które stanowiły główną tematykę rozprawy doktorskiej.

W latach 2009-2010, na zlecenie Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze, byłem współwykonawcą badań nt. „Opracowanie warunków wielokierunkowego wykorzystania hydrodynamicznej dezintegracji w procesie dwustopniowej fermentacji osadów” oraz „Badania uzupełniające skuteczność fermentacji w aspekcie uwalniania fosforu i możliwości wytrącania oraz badania jakości osadów pofermentacyjnych w szczególności w aspekcie zdolności odwadniania” [**II.F.1., I.F.2.**].

Do głównych osiągnięć naukowo-badawczych nie związanych z badaniami wskazanymi jako główne „osiągnięcie naukowe” [**I.B.1-I.B.8.**], należy również aktywność naukowa w ramach międzynarodowego projektu badawczego pt.: „Novel processing routes for effective sewage sludge management - Nowe kierunki efektywnych rozwiązań w procesach gospodarki osadami ściekowymi”, akronim: Routes, w ramach 7 Programu Ramowego; COOPERATION (ENV - Innovative system solutions for municipal sludge treatment and management) [**II.J.3.**]. Działalność tą realizowałem w latach 2011-2014 i dotyczyła ona wpływu dezintegracji osadów ściekowych (alkalizacja, kawitacja, procesy hybrydowe) na efektywność procesu fermentacji metanowej w warunkach mezofilowych i/lub termofilowych. Wyniki zostały opublikowane w pracach [**II.E.3., II.E.4., II.E.37., II.E.38., II.E.39.**] oraz zaprezentowane na konferencjach [**III.B.13., III.B.15., III.B.24**].

W tym samym okresie (2011-2014) uczestniczyłem również w realizacji projektu „Zastosowanie fermentacji psychrofilowej do wstępnego oczyszczania ścieków komunalnych” [**II.J.5.**] oraz procesów oczyszczania ścieków przemysłowych, realizowanych w ramach działalności statutowej. Mój udział w/w pracach badawczych polegał na przygotowaniu stanowiska do badania ilości produkowanego biogazu, jego zintegrowania z ze złożem biologicznym oraz przeprowadzeniu badań pomiaru ilości/jakości produkowanego biogazu

i oznaczeń zawartości związków organicznych. Wyniki badań zostały opublikowane w pracach [II.A.7., II.E.2., II.E.41].

Ad. 2) Procesy kofermentacji i oczyszczania powstałych wód pofermentacyjnych

W roku 2010 rozpocząłem badania związane z rozprawą doktorską, a ich głównym celem było opracowanie koncepcji zintegrowanego układu technologicznego, który zapewniłby wysoką efektywność kofermentacji odpadów (odpady rolnicze + organiczna frakcja odpadów komunalnych, osady ściekowe + organiczna frakcja odpadów komunalnych) oraz oczyszczenie wód pofermentacyjnych w stopniu umożliwiającym bezpośrednio ich odprowadzenie do zbiornika naturalnego. Uzyskane rezultaty badań zostały opublikowane w czasopismach naukowych [II.E.8., II.E.9., II.E.10., II.E.11., II.E.13., II.E.14., II.E.15., II.E.17., II.E.18.] oraz zaprezentowane w formie wystąpień ustnych na dwóch konferencjach międzynarodowych [II.L.6., II.L.7.]. Ten etap badań został zakończony obroną pracy doktorskiej „Proces mezofilowej kofermentacji odpadów intensyfikowany promieniowaniem mikrofalowym” na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej (24 luty 2012 r.). Pracę doktorską obroniłem z wyróżnieniem. Przedstawione wyniki dezintegracji mikrofalowej osadów ściekowych zostały następnie rozszerzone o prace eksperymentalne dotyczące termicznej metody dezintegracji oraz analizy mikrobiologiczne pozostałości pofermentacyjnych. Uzyskane wyniki w formie rozszerzonej zostały opublikowane w czasopiśmie naukowym *Bioresource Technology* [II.A.4.].

Pod koniec badań zmierzających do opracowania koncepcji zawartej w mojej rozprawie doktorskiej, byłem również zaangażowany w badania prowadzone w ramach grantu „Proces kofermentacji produktów odpadowych z produkcji biopaliw i osadów ściekowych intensyfikowany promieniowaniem mikrofalowym” [II.J.4]. W ramach realizowanych badań wyznaczyłem najkorzystniejsze udziały gliceryny odpadowej i wyłoków rzepakowych, zapewniające wysoką efektywność oraz stabilność procesu mezofilowej kofermentacji z nadmiernymi osadami ściekowymi. Następnie przeprowadziłem oczyszczanie wód pofermentacyjnych metodą łączącą procesy strącania struwitu z wysokociśnieniową filtracją membranową, co skutkowało obniżeniem stężeń analizowanych zanieczyszczeń (substancje biogenne, związki organiczne, zawiesina ogólna) do poziomu umożliwiającego - bezpośrednio ich odprowadzenie do odbiornika naturalnego. W ramach prowadzonych zadań kierowałem zadaniem badawczym dotyczącym opracowania warunków kofermentacji. Natomiast procesy doczyszczania wód pofermentacyjnych zostały przeprowadzone przy współpracy z pracownikami Zakładu Chemii Środowiska i Procesów Membranowych (Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechniki Śląskiej).

Uzyskane wyniki zaprezentowano na konferencjach międzynarodowych [II.L.3., II.L.4., II.L.5.], opublikowano w formie streszczeń konferencyjnych [II.E.28., II.E.29., II.E.30., II.E.33., II.E.34., II.E.35., II.E.36.] oraz publikacji w czasopiśmie naukowych [II.A.1., II.A.2., II.A.3., II.A.5., II.A.6., II.E.1., II.E.5.].

Za osiągnięcia naukowe, publikacje i udział w konferencjach naukowych zostałem uhonorowany indywidualną nagrodą Rektora Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej [II.K.4.].

W ostatnim czasie uczestniczyłem w badaniach dotyczących kofermentacji niekonwencjonalnej biomasy typu: algi i rośliny wodne. Rezultaty badań zostały przedstawione w pracy [II.E.6.].

Ad. 3). Współpraca z otoczeniem społecznym oraz popularyzacja nauki i innowacyjnych rozwiązań

W związku z moim udziałem w konsorcjum naukowym [III.E.2.] oraz powołaniem na kierownika zespołu naukowo-badawczego „Sekcja utylizacji odpadów i gospodarowania zasobami odnawialnymi”, nawiązałem współpracę z Urzędem Miasta Bielska-Białej w zakresie analiz istniejących technologii gospodarki odpadami komunalnymi. W grudniu 2018 roku rozpoczęta została współpraca pomiędzy Akademią Techniczno-Humanistyczną, DTU (Technical University of Denmark) i miastem Kopenhaga, w celu opracowania efektywnych metod odzysku kwasu mlekowego z pozostałości po fermentacji biofrakcji odpadów komunalnych. Obecnie kieruję tymi badaniami z ramienia Akademii Techniczno-Humanistycznej.

Do moich osiągnięć w tym zakresie zaliczam również uczestnictwo w Beskidzkim Festiwalu Nauki i Sztuki oraz innych działaniach promujących naukę na Wydziale. Prowadziłem wykłady gościnne dla szkół średnich, m.in. „Odzysk i recycling odpadów - świadomość ekologiczna społeczeństwa” oraz zajęcia typu Open-lab. Aktywnie uczestniczyłem również w promocji innowacyjnych rozwiązań z inżynierii środowiska „Zero waste household” (Copenhagen Science Week, 2014) [III.J.].

Plany dalszej działalności naukowej

W ramach moich dalszych prac badawczych zamierzam skupić swoją uwagę na:

- 1) wykorzystaniu odpadowego dwutlenku węgla do produkcji kwasu bursztynowego z zastosowaniem *A. succinogenes* i innych mikroorganizmów;
- 2) waloryzacji i ocenie jakościowej frakcji lignin, odzyskanej w wyniku delignifikacji biomasy podczas procesów wstępnej obróbki biomasy;
- 3) opracowaniu koncepcji biorafinerii zmierzającej do osiągnięcia maksymalnego wykorzystania wszystkich komponentów biomasy;
- 4) procesach odzysku wartościowych produktów (m.in. furfuralu) z frakcji ciekłych po procesach obróbki biomasy lignocelulozowej;
- 5) procesach fermentacji i kofermentacji biomasy niekonwencjonalnej.

Podsumowanie dorobku habilitanta

Efektom mojej działalności naukowo-badawczej w ramach osiągnięcia naukowego, a także w innych obszarach zainteresowań, jest 58 publikacji naukowych, a ściślej:

- 15 artykułów w czasopismach z listy JCR o łącznym impact factor (IF): **40,825** (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora);
- 24 publikacje w czasopismach nieposiadających IF (w tym punktowane cykliczne materiały konferencyjne);
- 19 abstraktów, streszczeń i doniesień itp.

Zgodnie z kryteriami MNiSW, łączny dorobek oceniany jest na **556 punktów**, w czym po uzyskaniu stopnia doktora oceniany jest na **473 punktów**.

Liczba cytowań publikacji:

Liczba cytowań oraz indeks Hirscha (h) moich publikacji wg informacji z różnych baz danych (stan na dzień 25.02.2019 r.):

- według bazy Web of Science (WoS): 147 (114 bez autocytowań). Baza uwzględnia 21 prac.
- według Scopus 171 (140 bez autocytowań). Baza uwzględnia 17 prac.
- według Google Scholar Citations 252. Baza uwzględnia 20 prac.
- według Researchgate 152. Baza uwzględnia 13 prace.

Indeks Hirscha:

- według bazy Web of Science (WoS): 6
- według Scopus 6
- według Google Scholar Citations: 7, i10-indeks - 6

Uczestniczyłem w 5 stażach (w tym 2 na zaproszenie instytucji zagranicznej) w zagranicznych ośrodkach naukowych (Dania, Technical University oraz Stany Zjednoczone, University of California, Berkeley, Haas School of Business). Byłem uczestnikiem jednego stażu w krajowym ośrodku naukowym (Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki). W Polsce ukończyłem natomiast koordynowany przez Politechnikę Śląską cykl kształcenia dotyczący przedsiębiorczości w nauce.


W ramach mojej dotychczasowej działalności naukowej kierowałem/kieruję 2 projektami badawczymi (w tym 1 pozyskany ze źródeł zewnętrznych). Ponadto, uczestniczyłem w 3 projektach badawczych, w tym jednym międzynarodowym w ramach 7. Programu Ramowego UE. Aktywnie uczestniczyłem w ocenie projektów naukowych i wdrożeniowych, w tym ze środków UE.

Uczestniczyłem w 24 konferencjach naukowych (międzynarodowych i krajowych), na których wygłosiłem 7 wystąpień ustnych oraz zaprezentowałem 17 posterów/plakatów. Brałem udział w komitetach organizacyjnych 3 międzynarodowych konferencji naukowych. W 2018 roku otrzymałem nagrodę za najlepszą prezentację podczas konferencji organizowanej przez Elsevier (BIORESTEC 2018 Best Poster Awards).

Do ważnych osiągnięć zaliczam również promotorstwo 14 prac inżynierskich oraz 5 prac magisterskich. Recenzowałem ponad 30 prac inżynierskich i/lub magisterskich. Jestem członkiem zespołu sprawującego opiekę naukową nad doktorantem (DTU Environment, Ingolfur Bragi Gunnarsson). Jestem egzaminatorem zewnętrznym w bazie CensorNet - Censorkorps dla kategorii: inżynieria środowiska i chemii środowiska (baza umożliwia pracę ekspercką i recenzje prac magisterskich dla wszystkich jednostek naukowych w Danii). Jak do tej pory 3 razy pełniłem funkcję recenzenta zewnętrznego prac magisterskich (DTU Environment, 2015-2018). Ponadto, wykonałem 35 recenzji prac naukowych (w tym 31 z bazy JCR).

W związku z pełnieniem funkcji Wydziałowego Koordynatora Programu Erasmus (obecnie Przewodniczącego Zespołu Wydziałowych Koordynatorów ds. Programu Erasmus+), koordynowałem wyjazd 25 studentów do uczelni partnerskich oraz przyjazd ponad 40 studentów z uczelni partnerskich.

Moje zaangażowanie w działalności zawodowej zostało uhonorowane 4 nagrodami Rektora ATH (2010-2014, 2016, 2017, 2018), w tym dla kategorii „za uzyskanie największej wartości wskaźnika IF (impact factor)” w skali uczelni.


podpis Wnioskodawcy