

dr inż. Szymon Szufa

Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i  
Ochrony Środowiska, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa  
Pracy

ul. Wólczańska 213, 93-005, Łódź

tel. 606-134-239

adres e-mail: szymon.szufa@p.lodz.pl

**Autoreferat  
przedstawiający opis dorobku oraz osiągnięć naukowych**

do wniosku o przeprowadzenie

postępowania habilitacyjnego z obszaru dziedziny

**Nauk Inżynieryjno-Technicznych** w dyscyplinie naukowej **Inżynieria Chemiczna**

**„Proces toryfikacja biomasy, kinetyka oraz właściwości fizykochemiczne  
produktów finalnych”**

jako 1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. B.

## Spis treści

1. <i>Imię i nazwisko</i> .....	3
2. <i>Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.</i> .....	3
3. <i>Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.</i> .....	3
3.1. <i>Ogólna charakterystyka dorobku naukowego</i> .....	4
4. <i>Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).</i> .....	5
4.1. <i>Omówienie hipotezy/celu naukowego</i> .....	8
4.2. <i>Omówienie wyników badań, uzyskanych rezultatów oraz sformułowanie najważniejszych wniosków</i> .....	12
4.4. <i>Wkład w rozwój dyscypliny</i> .....	49
5. <i>Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.</i> .....	51
6. <i>Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.</i> .....	54
7. <i>Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.</i> .....	57

### **1. Imię i nazwisko**

Szymon Szufa

### **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

- Studia MBA Energetyka (Master of Business Administration), tytuł uzyskany w dniu 18 marca 2017, Uczelnia Łazarskiego w Warszawie, Wydział Ekonomii i Zarządzania. Temat dyplomu MBA Energetyka: „Strategia rozwoju i plan jej wdrożenia spółki świadczącej usługi B+R oraz szkoleniowo-doradcze na przykładzie firmy APS-Ekoinnowacje Sp. z o.o.”
- dr nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn nadany uchwałą Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej z dnia 12 grudnia 2014r. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Toryfikacja i współspalanie biomasy - modelowanie procesów”.
- mgr inż. - tytuł zawodowy uzyskano w dniu 11 lipca 2008r., w specjalności: „Energetyka ze Źródeł Odnawialnych”, na kierunku Energetyka na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Tytuł pracy magisterskiej: „Charakterystyka procesu spalania pyłu węglowego w atmosferze wzbogaconej w tlen i w dwutlenek węgla, zapłon, reaktywność, emisja”.

### **3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.**

W latach 2009-2014 doktorant i kierownik projektu Preludium (NCN) na Wydziale Mechanicznym (Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa) Politechniki Łódzkiej.

15.04.2010-14.10.2010 Asystent Naukowy - Fraunhofer Institute ITWM - Institute for Industrial Mathematics (Kaiserslautern, Germany), [www.itwm.fraunhofer.de](http://www.itwm.fraunhofer.de). (program Marie Skłodowska-Curie (MRTN-CT-2006-035559 “A Computer Aided Engineering Approach to Smart Structures Design”)

Od 2 stycznia 2019 r. zatrudniony na Politechnice Łódzkiej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska (obecnie w Katedrze Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy na stanowisku Adiunkt w Grupie Pracowników Badawczych, Koordynator Projekt BioTrainValue, MSC SE Horyzont Europa).

1.04.2022-31.07.2023 POSTDOC: “Postdoctoral Researcher – Reduced-Order Kinetic Modelling of high moisture, low quality biomass hydrothermal conversion”: (praca w trybie hybrydowym), Adiunkt Naukowy, National University of Ireland NUI Galway: (Galway, Irlandia) Projekt Horyzont 2020: “F-CUBED Future Feedstock Flexible Carbon Upgrading to Bio Energy Dispatchable carriers”, <https://www.f-cubed.eu/>

1.07.2021-31.10.2023 POSTDOC (50% etatu), Adiunkt Naukowy, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Biogospodarki Stosowanej (praca w trybie hybrydowym), Projekt Horyzont 2020: "BECoop-Unlocking the community energy potential to support the market uptake of bioenergy heating technologies", <https://www.becoop-project.eu/>

01.07.2022-31.06.2024 POSTDOC Stypendium im. Mieczysława Bekkera NAWA: Adiunkt Naukowy „BioGainValue Badania nad procesem toryfikacji biomasy z wykorzystaniem pary przegrzanej oraz właściwościami nowych biomateriałów”: BPN/BEK/2021/1/00248 Narodowy Instytut Chemii, Katedra Katalizy i Inżynierii Reakcji Chemicznych: (SŁOWENIA, Lubljana) –Opiekun Naukowy prof. Blaz Likozar.

### 3.1. Ogólna charakterystyka dorobku naukowego

Tematyka realizowanych badań naukowych i prac rozwojowych dotyczy głównie rozwiązań w zakresie konwersji biomas z wykorzystaniem procesu termiczno-chemicznych w tym w głównej mierze procesu toryfikacji oraz badaniem właściwości fizyko-chemicznych tych biomas z ich przeznaczeniem dla energetyki, rolnictwa i przemysłu chemicznego. Kluczowym aspektem prowadzonych prac jest wykorzystanie oraz ocena możliwości zastosowania procesu toryfikacji w przemyśle z uwzględnieniem zużycia energii oraz wpływu na środowisko. Prowadzone działania są spójne m.in. z koncepcją Circular Economy oraz z Europejskim Zielonym Ładem, tj. planem działania na rzecz zrównoważonej gospodarki UE.

H-Indeks = 15 (według Web of Science z dn. 23.09.2023.)

	Przed uzyskaniem stopnia dr	Po uzyskaniu stopnia dr	Razem
Artykuły w czasopismach indeksowanych w <i>Journal Citation Report</i> (ujęte w wykazie MEiN)	2	36 (w tym 11 stanowiących cykl)	38
Artykuły w czasopismach recenzowanych o zasięgu międzynarodowym i krajowym (w tym artykuły w czasopismach ujętych na liście B MNiE oraz poza nią)	4	6	10
Rozdziały w monografiach naukowych w języku polskim i angielskim	7	5	12
Manografie w języku polskim	0	0	0
Aktywność w zakresie konferencji o zasięgu międzynarodowym i krajowym	21	19	40
Zgłoszenia i patenty	2 – zgłoszenia do UPRP	3 – zgłoszenia do UPRP	5

Szczegółowy wykaz dorobku naukowego przedstawiono w *Załączniku 3*.

**4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).**

Za osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego wskazuję cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. B.

Przedstawiona rozprawa habilitacyjna pt.

**„Proces toryfikacji biomasy, kinetyka oraz właściwości fizykochemiczne produktów finalnych”**

stanowi cykl 10 powiązanych tematycznie publikacji [A1-A10] stanowiących znaczący wkład w rozwój dyscypliny, dostępnych w systemie Open Access wybranych z dorobku publikacyjnego tj. 38 pozycji według bazy Web of Science z dn. 23.09.2023.). W następujących publikacjach jestem pierwszym autorem [A2, A6-A10], w tym jedynym autorem w pracy [A9]. Dodatkowo w 9 artykułach jestem autorem korespondującym.

[A1] Kazimierski, P.; Kosmela, P.; Piersa, P.; Szufa, S. Pyrolysis and Torrefaction—Thermal Treatment of Creosote-Impregnated Railroad Ties as a Method of Utilization. *Materials* 2023, 16, 2704. doi: 10.3390/ma16072704

**(IF 2023) = 3.4 (Five Years 3.8), pkt z wykazu MEiN = 140**

Mój wkład: Opracowanie koncepcji badań and toryfikacją podkładów kolejowych; Współdziałal w przygotowaniu dyskusji and wynikami procesu toryfikacji podkładów kolejowych; Przegląd literaturowy; Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu (25%).

[A2] Szufa S.; Piersa P.; Junga R.; Błaszczuk A.; Modlinski N.; Marczak-Grzesik M.; Sobek S.; Adrian Ł.; Dzikuc M. Numerical modeling of the co-firing process of an in situ steam-torrefied biomass with coal in a 230 MW industrial-scale boiler, *Energy*, Volume 263, Part E, 2023, 125918, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125918>

**(IF 2023)= 9 (Five Years 7.5), pkt z wykazu MEiN = 200**

Mój wkład: Główny twórca hipotezy badawczej; Wytworzenie toryfikatów ze słomy z kukurydzy jako paliwa w parze przegrzanej; Współtwórca analizy termogravimetrycznej and procesem toryfikacji słomy z kukurydzy; Wykonanie analizy elementarnej i technicznej toryfikatu ze słomy z kukurydzy; Współdziałal w redagowaniu wniosków i dyskusji wyników; Przegląd literaturowy (współdziałal); Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu. (50%).

[A3] Slezak, R.; Unyay, H.; Szufa, S.; Ledakowicz, S. An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Reactors Torrefaction vs. Biomass Pyrolizers—Part 2. *Energies* 2023, 16, 2212. doi: 10.3390/en16052212

**(IF 2023)= 3.2 (Five Years 3.3), pkt z wykazu MEiN = 140**

Mój wkład: Współtwórca głównej hipotezy badawczej; Współtworzenie materiałów dotyczących konstrukcji i eksploatacji reaktorów do procesu pirolizy; Przegląd literaturowy (współudział); Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu (25%).

[A4] Piersa, P.; Unyay, H.; Szufa, S.; Lewandowska, W.; Modrzewski, R.; Ślęzak, R.; Ledakowicz, S. An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Torrefaction Reactors vs. Biomass Pyrolysis—Part 1. *Energies* 2022, 15, 2227. doi: 10.3390/en15062227

**(IF 2023)= 3.2 (Five Years 3.3), pkt z wykazu MEiN = 140**

Mój wkład: Współudział w tworzeniu głównej hipotezy badawczej; Opracowanie przeglądu parametrów technicznych reaktorów przeznaczonych do toryfikacji biomasy; Przegląd literaturowy (współudział); Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu (40%).

[A5] Piersa, P.; Szufa, S.; Czerwińska, J.; Unyay, H.; Adrian, Ł.; Wielgosinski, G.; Obraniak, A.; Lewandowska, W.; Marczak-Grzesik, M.; Dzikuć, M.; Romanowska-Duda, Z.; Olejnik, T.P. Pine Wood and Sewage Sludge Torrefaction Process for Production Renewable Solid Biofuels and Biochar as Carbon Carrier for Fertilizers. *Energies* 2021, 14, 8176. doi: 10.3390/en14238176

**(IF 2021)= 3.004 (Five Years 3.085), pkt z wykazu MEiN = 140**

Mój wkład: Twórca głównej hipotezy badawczej; Wykonanie analizy termogravimetrycznej procesu toryfikacji sosny i osadów ściekowych; Współudział w redagowaniu wniosków i dyskusji wyników – zastosowanie toryfikatów z sosny i osadów ściekowych jako paliwa dla energetyki; Przegląd literaturowy (współudział); Współtworzenie manuskryptu (40%).

[A6] Szufa, S.; Piersa, P.; Adrian, Ł.; Czerwińska, J.; Lewandowski, A.; Lewandowska, W.; Sielski, J.; Dzikuć, M.; Wróbel, M.; Jewiarz, M.; Knapczyk, A. Sustainable Drying and Torrefaction Processes of Miscanthus for Use as a Pelletized Solid Biofuel and Biocarbon-Carrier for Fertilizers. *Molecules* 2021, 26, 1014. doi: 10.3390/molecules26041014

**(IF 2021)= 4.927 (Five Years 5.110), pkt z wykazu MEiN = 100**

Mój wkład: Główny twórca hipotezy badawczej; Wykonanie analizy elementarnej i technicznej Miskanta przed i po procesie toryfikacji; Współudział w pracach przy analizie termogravimetrycznej and procesem toryfikacji Miskantusa i osadu ściekowego; Przeprowadzenie dyskusji wyników dotyczących analizy procesu toryfikacji Miskantusa; Przegląd literaturowy (współudział); Współtworzenie manuskryptu (40%).

[A7] Szufa, S.; Piersa, P.; Adrian, Ł.; Sielski, J.; Grzesik, M.; Romanowska-Duda, Z.; Piotrowski, K.; Lewandowska, W. Acquisition of Torrefied Biomass from Jerusalem Artichoke

Grown in a Closed Circular System Using Biogas Plant Waste. *Molecules* 2020, 25, 3862. doi: 10.3390/molecules25173862

**(IF 2020)= 4.411 (Five Years 4.587), pkt z wykazu MEiN = 100**

Mój wkład: Główny twórca hipotezy badawczej; Wykonanie analizy termogravimetrycznej procesu spalania toryfikatu ze słonecznika bulwiastego/Topinmbura; Wykonanie bilansów masowych; Przeprowadzenie badań procesu toryfikacji w reaktorze wsadowym (budowa reaktora); Opracowanie wyników końcowych (wyniki z analizy termogravimetrycznej); Przegląd literaturowy (współdział); Współtworzenie manuskryptu (50%).

[A8] Szufa, S.; Wielgoński, G.; Piersa, P.; Czerwińska, J.; Dzikuć, M.; Adrian, Ł.; Lewandowska, W.; Marczak, M. Torrefaction of Straw from Oats and Maize for Use as a Fuel and Additive to Organic Fertilizers—TGA Analysis, Kinetics as Products for Agricultural Purposes. *Energies* 2020, 13, 2064. doi: 10.3390/en13082064

**(IF 2020)= 3.004 (Five Years 3.085), pkt z wykazu MEiN = 140**

Mój wkład: Główny twórca hipotezy badawczej; Współwykonawca analizy termogravimetrycznej procesu toryfikacji słomy z owsa i słomy z kukurydzy; Przeprowadzenie dyskusji wyników and procesem toryfikacji słomy z owsa i słomy z kukurdy; Przegląd literaturowy (współdział); Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu. (40%).

[A9] Szufa S., Use of superheated steam in the process of biomass torrefaction, *PRZEMYSŁ CHEMICZNY* 2020, 99 (12), p.1797-1801, <https://doi.org/10.15199/62.2020.12.22>

**(IF 2020)= 0.464 (Five Years 0.402), pkt z wykazu MEiN = 70**

Mój wkład: twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, recenzja, projekt instalacji do toryfikacji biomasy, opracowanie wniosków, opracowanie manuskryptu (100%).

[A10] Szufa S., Adrian Ł., Piersa P., Romanowska-Duda Z., Grzesik M., Cebula A., Kowalczyk S. Experimental studies on energy crops torrefaction process using batch reactor to estimate torrefaction temperature and residence time In *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer Proceedings in Energy ICORES 2017*; Mudryk, K., Werle, S., Eds.; Springer Proceedings in Energy, 2018, ISBN 978-3-319-72370-9, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_35), p. 365-373

**pkt z wykazu MEiN = 70**

Mój wkład: Główny twórca hipotezy badawczej; Budowa instalacji do toryfikacji roślin energetycznych; Badania and procesem toryfikacji – wytworzenie toryfikatów w reaktorze wsadowym; Przeprowadzenie dyskusji wyników and procesem toryfikacji w reaktorze wsadowym; Przegląd literaturowy (współdział); Recenzja wewnętrzna artykułu; Współtworzenie manuskryptu (50%).

Oświadczenia dotyczące wkładu w poszczególne artykuły stanowią *Załącznik nr 5*.

Suma punktów ministerialnych za cykl publikacji: 533 pkt.;  $\sum IF=34,61$

#### **4.1. Omówienie hipotezy/celu naukowego**

Zaprezentowany cykl publikacji powstał w wyniku realizacji projektów badawczo-rozwojowych oraz z wyniku współpracy z innymi instytucjami naukowymi z kraju i z zagranicy. Udział w projekcie ERA-FELLOWSHIP w Niemczech w roku 2020 pozwolił na nawiązanie współpracy z ośrodkiem ze Słowenii (National Institute of Chemistry Ljubljana) a realizacja projektu TOP500 Innovators w Cambridge w roku 2015 pozwolił na nawiązanie kontaktu z grupą naukowców z Aston University (EBRI) z Wielkiej Brytanii. Z zainicjowanej współpracy także z irlandzkim uniwersytetem National University of Ireland Galway oraz ze współpracą powyższymi instytucjami udało się pozyskać środki na prace badawczo-rozwojowe i wymianę kadry w obszarze toryfikacji, pirolizy i zgazowania biomasy czego finałem jest koordynowanie projektu BioTrainValue w ramach konkursu Marie Skłodowskiej-Curie Staff Exchange: <https://cordis.europa.eu/project/id/101086411/pl>. Wraz ze zdobyciem środków na badania w ramach konkursu Lider IX (projekt BIOCARBON) i jego realizacją udało się zakupić generator pary (kocioł parowy) na Politechnice Łódzkiej, zaprojektować i wybudować układ do toryfikacji biomas z wykorzystaniem pary przegrzanej (kocioł na biomasę, suszarka obrotowa typu: „rolling-bed”, reaktor przeciwprądowy do toryfikacji) o wydajności 50 kg/h. Zaprezentowane wyniki badań doświadczalnych procesu toryfikacji biomas z wykorzystaniem gazów obojętnych (azot, argon i dwutlenek węgla) jak i pary przegrzanej, które pozwoliły na zaprojektowanie i wytworzenie instalacji procesu toryfikacji biomas z wykorzystaniem pary przegrzanej pracującej w trybie ciągłym w skali pilotażowej. Dowiedziono, że niewykorzystane odpady ze słomy z kukurydzy oraz słoma z owsa, rośliny energetyczne jak Miskantus, biomasa drzewna – trocina z sosny oraz wysuszone osady ściekowe z oczyszczalni ścieków mogą być dobrymi substratami do wytwarzania w wyniku poddania ich konwersji fizyko-chemicznej (w tym konwersji parą przegrzaną – słoma z kukurydzy – jako odpowiednie paliwo do współspalania [A2]) w procesie toryfikacji nowych bio-produktów. Wśród bio-produktów należy wymienić: odnawialne paliwo stałe (karbonizat, toryfikat), biowęgiel jako bogaty w pierwiastek węgla dodatek do nawozów organicznych), bio-sorbent (węgiel aktywny) służący do usuwania metali ciężkich (np. Hg – rtęci) ze spalin z elektrowni węglowych. Zastosowanie pary przegrzanej pozwala na odzyskiwanie produktów ubocznych procesu toryfikacji z pary, które ulega kondensacji oraz pozwala na odzyskiwanie ciepła kondensacji do podgrzania powietrza, którym dokonywany jest wstępny proces suszenia biomasy z zawartości wilgoci 50% do zawartości wilgoci 10%. Dodatkowym atutem wykorzystania pary przegrzanej jest precyzyjna kontrola temperatury procesu toryfikacji w reaktorze oraz niskie koszty wytworzenia w momencie gdy do jej produkcji stosujemy tak jak w naszym przypadku zrębki drzewne.

Zaprezentowany autoreferat skupia się w głównej mierze na analizie procesu toryfikacji wybranych biomas pochodzenia drzewnego, rolniczego oraz roślin energetycznych i osadu ściekowego w zakresie: kinetyki, ubytku mas, analizy lotnych związków organicznych oraz analizie właściwości fizyko-chemicznych powstałych toryfikatów [A5, A6, A7, A8]. Opracowane wyniki pozwoliły na zaprojektowanie układu do toryfikacji biomas w skali pilotażowej o wydajności 50kg/h z wykorzystaniem pary przegrzanej [A9]. Wyniki przeprowadzonych badań umieszczone w załączonym cyklu publikacji były konsultowane z



interdyscyplinarnym zespołem składającym się z: agro-inżynierów, energetyków, inżynierów procesowych, chemików, biologów i ekonomistów.

Mój wkład w powstanie zawartych w autoreferacie publikacji jest dominujący. Dodatkowo załączyłem oświadczenia wszystkich współautorów w tworzeniu publikacji, które zostały zamieszczone w załączniku numer 5. Wyniki zrealizowanych prac badawczo-rozwojowych nad procesem toryfikacji tworzą główny rdzeń autoreferatu:

1. Analiza kinetyki procesu toryfikacji [A2, A5, A6, A7, A8]
2. Właściwości fizyko-chemiczne toryfikatów [A1, A5, A6, A7, A8, A10]
3. Instalacja do procesu toryfikacji biomas w parze przegrzanej [A9]

Rdzeniem zaprezentowanych w autoreferacie publikacji jest przedstawiona analiza kinetyki procesu toryfikacji jak i analiza ubytków mas wykonanych w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem pieca elektrycznego oraz analiza takich właściwości fizyko-chemicznych toryfikatów jak: skład elementarny, ciepło spalania i wartość opałowa, analiza powierzchni i składu mineralnego toryfikatów SEM-EDX.

Na świecie rolnicy wielkohektarowi, zakłady przetwórstwa rolno-spożywczego oraz mali i średni rolnicy indywidualni wytwarzają każdego roku bardzo duże ilości odpadów rolniczych. Biorąc pod uwagę słomę (łodygi, liście), łuski i inne rodzaje odpadów jak łupiny, czyste kolby z kukurydzy a także biomasę z roślin energetycznych, stanowią one 50 miliardów ton światowej rocznej produkcji. Masę słomy rolniczej zebranej w Polsce szacuje się na 25-33 mln Mg rocznie. Każdego roku powstają ogromne ilości odpadów ze słomy z owsa i z kukurydzy, ponieważ kukurydza jest jedną z najpopularniejszych podstawowych roślin uprawnych na świecie. Przeprowadzono niewiele badań na temat zagospodarowania odpadów z owsa i kukurydzy lub ich ponownego wykorzystania jako biomasy.

Polska energetyka stoi obecnie przed poważnymi wyzwaniami, gdyż opiera się na węglu kamiennym jako podstawowym źródle ciepła i energii elektrycznej. Jeden z najbardziej obiecującym substytutem paliw kopalnych jest biomasa. Biomasa jako energii odnawialna źródła ma ogromne perspektywy jako zamiennik węgla kopalnego szacunkowy potencjał energetyczny, tylko w Polsce jest to 835 PJ rocznie. Potencjał ten obejmuje biomasę pochodzenia leśnego i biomasę pochodzenia rolniczego, przede wszystkim słomę ze zbóż i kukurydzy, a także pochodzenia komunalnego z terenów zielonych, przemysłu rolno-spożywczego i odpadów biologicznych. Istnieje jednak poważna przeszkoda w wykorzystaniu biomasy na dużą skalę w polskiej energetyce. Obecnie głównym źródłem wytwórczym energii elektrycznej i ciepła w kraju są w dalszym ciągu elektrownie konwencjonalne opalane węglem kamiennym i brunatnym, w których doświadczenia z wykorzystaniem biomasy nieprzetworzonej podczas współspalania pozwoliły na zidentyfikowanie szeregu problemów związanych w głównej mierze z różną temperaturą topnienia popiołów biomasy i węgla kamiennego.

W badaniach przeprowadzono proces toryfikacji najbardziej dostępnego i dość taniego wsadu, jakim są odpady z owsa i z kukurydzy, zrębka sosny, Miskantus i odpady z oczyszczalni ścieków czy takie biomasy jak Ślazowiec Pensylwański, wierzba energetyczna i słonecznika

bulwiasty z wykorzystaniem analizatora termogravimetrycznego i pieca laboratoryjnym w atmosferze obecności gazów inertnych: azotu, argonu i CO<sub>2</sub>.

Biowęgiel jako dodatek do nawozów ma duży potencjał użytkowy w rolnictwie, jako baza – nośnik pierwiastka węgla do naturalnych nawozów dedykowanych dla ogrodnictwa i upraw szklarniowych oraz dla rolnictwa wielkoobszarowego. Oprócz ściółki i paszy w przemysłowej hodowli drobiu i zwierząt stanowi pochłaniacz gnojowicy i poprawiają dynamikę kompostownika obornika. Jego zastosowanie jest odpowiedzią na potrzeby rynku związane z poprawą właściwości gleb, ograniczeniem stosowania nawozów mineralnych i środków ochrony roślin oraz sekwestracją węgla w glebie. Efektami stosowania biowęgla doglebowego są: regulacja pH, poprawa właściwości wodnych gleby i właściwości termicznych gleby, lepsze wykorzystanie nawozów przez rośliny, zmniejszenie zanieczyszczenia wody, pozytywny wpływ na wzrost i plonowanie roślin, wpływ na zwiększenie aktywności mikroorganizmów, lepsza gleba (poprawa procesów glebotwórczych), długotrwałe skutki, sekwestracja dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>), wpływ na łagodzenie zmian klimatycznych, wzrost zawartości substancji organicznych w glebie, wzrost wilgotności gleby, wpływ na zwiększenie masy i jakości gleby korzeni systemu. Zastosowanie biowęgla w 2014 roku przyczyniło się do wzrostu kolonizacji korzeni przez grzyby mikoryzowe, wzrostu warzyw i plonowania jabłoni, brzoskwiń i nektarynek w 2015 roku. Zastosowanie biowęgla przyczyniło się także do poprawy stanu wodnego gleby i roślin.

Dostępność, ilość suchej masy z 1 hektara, właściwości fizyko-chemicznych i skład biomas i odpadów ze słom generowanych z upraw rolniczych stanowiły czynniki determinujące wybór przedmiotu niniejszych badań.

Biowęgiel ze względu na swoje właściwości jest także doskonałym dodatkiem poprawiającym strukturę gleby do kompostowania: poprawia warunki powietrzno-wodne procesu. Znacząco ogranicza emisję amoniaku, ograniczając tym samym straty azotu i poprawiając jakość otrzymanego nawozu. Zmniejsza emisję gazów. Stosowanie biowęgla w glebie poprawia retencję, właściwości termiczne i gaz. Biowęgiel dzięki swoim właściwościom jonowym sprzyja lepszemu wykorzystaniu nawozów przez rośliny oraz zmniejsza ilość odpływu zanieczyszczeń. Wielkość światowego rynku biowęgla oszacowano na 283,2 Gg. Szacuje się, że światowy wzrost spożycia żywności bioorganicznej i zdolności biowęgla do zwiększania żyzności gleby i wzrostu roślin będzie najważniejszym czynnikiem wpływającym na rozwój rynku. Rynek światowy składa się z producentów biowęgla podlegających i nieograniczonych. W Chinach, Brazylii, Japonii i Meksyku duża część produkcji pochodzi z sektora nieuregulowanego. Oczekuje się, że do 2025 roku światowy rynek biowęgla osiągnie wartość 3,14 miliarda dolarów. Według European Biochar Foundation wolumen produkcji biowęgla w Europie na koniec 2014 roku wyniósł ponad 9 000 Mg rocznie. Ta stale rośnie, co biorąc pod uwagę powolną pirolizę (30% uzysku biowęgla z nadawy) daje roczny wolumen biomasy na poziomie 30 000 Mg, a przy szybkiej pirolizie do ok. 35 000 Mg rocznie. Przewiduje się, że europejski rynek biowęgla zwiększy swoje przychody ze 193 mln USD do 875 mln USD w latach 2017–2025, przy szacowanej złożonej rocznej stopie wzrostu (CAGR) wynoszącej 17,70%. Obecnie cała produkcja certyfikowanego biowęgla w Europie prowadzona jest w 7 liniach przemysłowych zlokalizowanych w czterech krajach: Niemczech, Austrii,

Szwajcarii i Wielkiej Brytanii. Szacuje się, że wielkość produkcji biowęgla w Europie jest jeszcze większa ze względu na dużą liczbę lokalnych, małych instalacji (być może ponad 100). Motorem rozwoju rynku biowęgla w Polsce będzie popyt nie tylko na biowęgiel jako produkt, ale przede wszystkim na produkty powstałe w wyniku jego wykorzystania.

Do nawożenia pól w Polsce wykorzystuje się słomę z kukurydzy i owsa. Po odliczeniu zapotrzebowania na ściółkę i paszę oraz ilości potrzebnej do orki powstają przelewy o różnym przeznaczeniu. Wielkość dodatkowej produkcji słomy według różnych źródeł wynosi ok. 8-13 mln Mg rocznie. Wartość opałowa słomy waha się od 14,3 do 15,2 MJ/kg. Pod względem energetycznym 1,5 Mg słomy odpowiada około jednemu Mg węgla. Masa słomy, którą można spalić jako biopaliwo stałe w energetyce, odpowiada wartości opałowej ok. 14 mln Mg węgla, co stanowi 10% rocznego wydobycia węgla kamiennego w Polsce. Ograniczeniem powszechnego wykorzystania słomy w energetyce i elektroenergetyce jest jej rozproszenie, zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych. Kolejnym bardzo ważnym czynnikiem jest to, że słoma jest materiałem zajmującym dużą objętość, co ma wpływ na koszty logistyczne, takie jak transport i magazynowanie. Realizacja polityki Komisji Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju, ograniczania zasobów naturalnych, opracowywania i stosowania technologii efektywnie wykorzystujących odpady oraz opracowywania nowych produktów ulegających biodegradacji i przyjaznych środowisku napędza rozwój tego rynku.

**Hipoteza:** Proces toryfikacji biomasy pozwala w sposób kontrolowany przekształcić biomasę pochodzenia rolniczego oraz biomasę drzewną o niekorzystnych właściwościach fizykochemicznych a także umożliwia zagospodarowanie cennych produktów ubocznych i ich ponownego wykorzystania w innych operacjach technologicznych, uzyskując w efekcie końcowym paliwa stałe, biowęgla jako dodatki do nawozów organicznych oraz biosorbenty.

Głównym celem pracy jest rozszerzenie zakresu wykorzystania biomasy rolnej i biomasy pochodzenia leśnego a także zwiększenie potencjału aplikacyjnego opracowanych, na bazie niniejszych pozostałości produkcyjnych, rozwiązań technologicznych.

Zdefiniowano następujące cele szczegółowe:

- I. Zidentyfikowanie nowych potencjalnych obszarów zastosowania biomasy rolniczej, odpadów stałych z biogazowni (poferment), osadów ściekowych oraz biomasy pochodzenia leśnego w odniesieniu do ich właściwości fizykochemicznych.
- II. Określenie warunków procesu toryfikacji dla biomasy rolniczej i drzewnej (kinetyka procesu toryfikacji – ubytek masy w czasie, temperatura, czas przebywania) w celu przygotowania optymalnych warunków do procesu toryfikacji w skali pilotażowej i produkcji toryfikatów dla 3 przeznaczeń: paliwa stałe, biowęgiel jako nośnik pierwiastka węgla oraz biosorbenty.
- III. Charakterystyka właściwości fizyko-chemicznych toryfikatów z biomasy rolniczej i biomasy drzewnej w celu identyfikacji ich najlepszego przeznaczenia w przemyśle.

## ***4.2. Omówienie wyników badań, uzyskanych rezultatów oraz sformułowanie najważniejszych wniosków***

### **I cel szczegółowy**

Identyfikacji potencjalnych obszarów zastosowania procesu toryfikacji w odniesieniu do ich właściwości dokonano na podstawie uzyskanych wyników w zakresie przeprowadzonych analiz wybranych (istotnych pod względem ich potencjalnego zastosowania) właściwości toryfikatów. Proces toryfikacji to proces termiczno-chemicznego przekształcania danego materiału w zakresie temperatur od 200 do 300-350 °C w atmosferze pozbawionej tlenu (najczęściej proces ten jest realizowany w atmosferze gazu inertnego: azot, dwutlenek węgla, argon lub para przegrzana). Proces toryfikacji jest znany od ponad 100 lat jako proces przygotowania i waloryzacji ziaren kawy w celu uzyskania odpowiedniej kruchości i odpowiednich właściwości zapachowych, toryfikacja na potrzeby energetyki czy dekarbonizacji przemysłu metalurgicznego badany jest od lat dziewięćdziesiątych XX wieku. W zaprezentowanym zestawieniu wyników prac badawczo-rozwojowych skupiono się na rezultatach dotyczących właściwości fizyko-chemicznych biomas w odniesieniu do ich potencjalnego zastosowania jako paliwa dla energetyki zawodowej [A1, A2, A5, A6, A7, A8, A9] czy jako dodatku do nawozów dla rolnictwa [A1, A9, A10].

Dodatkowo w pracy, która jest obecnie w trakcie decyzji u edytorów dokonano analizy potencjału wykorzystania odpadu pofermentu stałego jako odpadu do procesu toryfikacji i jego waloryzacji na potrzeby nośnika pierwiastka węgla do produkcji nawozów czy też jako paliwa. W Polsce funkcjonuje 346 biogazowni o łącznej mocy 257 MW, zaś w Turcji 106 biogazowni rolniczych o łącznej mocy 430 MW. Łączne ilości wyprodukowanego pofermentu z tych zakładów obliczono na 40 917 529 ton i 24 455 361 ton odpowiednio dla Turcji i Polski. W pracy porównano alternatywne metody przetwarzania pofermentu. Dla frakcji stałej pofermentu zaproponowano innowacyjną i alternatywną technologię toryfikacji parą przegrzaną. Proces ten może być bardziej efektywny ekonomicznie niż inne technologie i pozwalać odzyskiwać cenne produkty uboczne. Toryfikacja parą przegrzaną to udoskonalona wersja procesu toryfikacji, zapewniająca bardziej stabilną kontrolę temperatury, wyższą jakość produktu finalnego i możliwość odzyskania produktów ubocznych (np. cennych z pozycji przemysłu chemicznego kwasów: propionowy, lewulinowy, mrówkowy czy kwas octowy). Na podstawie wyników studium przypadku instalacji do toryfikacji w parze przegrzanej stwierdzono, że wykorzystanie pofermentu jako źródła energii może wnieść od 3,64% do 4,26% całkowitego zużycia energii w Turcji i Polsce w postaci energii z toryfikowanego pofermentu. W drugim studium przypadku została wykonana analiza innego wykorzystanie pofermentu jako nawozu mineralno-organicznego. Zgodnie z wynikami studium przypadku wykorzystanie przefermentowanej biomasy jako źródła nawozów mineralno-organicznych może potencjalnie wyprodukować około 16 142 806 ton i 9 648 142 ton nawozów mineralno-

organicznych odpowiednio dla Turcji i Polski. W końcu studia przypadków obliczenia wykazały niemożliwą do pominięcia ilość produkcji pofermentu i możliwość jego przyjaznego dla środowiska wykorzystania z różnymi aspektami.

Badania nad toryfikacją biomasy prowadzone są w kilkunastu instytucjach na świecie. Wykorzystywane są w tych badaniach lokalne zasoby biomasy, a więc o specyficznych właściwościach odnoszących się zarówno do jakości paliwowej jak i składu substancji mineralnej. Ukierunkowanie badań realizowanych w projekcie BIOCARBON Lider IX jak i w realizowanym projekcie BioTrainValue na procesy toryfikacji biomasy pochodzącej z regionu łódzkiego wnoszą nową wiedzę w tym zakresie.

Na świecie proces toryfikacji jest znany od stu lat jako metoda prażenia ziaren kawy. Na cele energetyki toryfikacja biomasy jest badana od około 30 lat, głównymi pionierami w tej dziedzinie są Holendrzy, którzy posiadają największą liczbę patentów na różne typy reaktorów służących do toryfikacji biomasy (np. firma Torrgas). Na dzień dzisiejszy istnieje kilka oddanych do użytku w pełni działających instalacji do toryfikacji biomasy pracującej w skali przemysłowej, np. w Irlandii miejscowości Arigna (firma Arigna Fuel, partner koordynowanego przez Politechnikę Łódzką projektu BioTrainValue produkuje biopaliwa stałe w formie brykietów na instalacji o wydajności 5 ton/godzinę). Istnieje wiele instalacji pilotażowych i półprzemysłowych pracujących w trybie ciągłym dłużej niż miesiąc, wśród nich są instalacje pracujące we Francji, Hiszpanii, Danii, Austrii oraz Kanadzie i Australii. Największym dorobkiem w dziedzinie toryfikacji biomasy może się poszczycić holenderski instytut naukowy TNO w Petten, który opatentował najbardziej wydajne rodzaje reaktorów do toryfikacji biomasy, które mogą osiągnąć bardzo dużą efektywność wymiany ciepła pomiędzy medium pośrednim jakim jest azot lub argon a biomasą – jednakże ze względu na koszty związane z rozdzieleniem azotu z powietrza w tak zwanym Air Separation Unit co jest wysoce energochłonnym procesem i zwiększa koszty całego procesu. W Polsce dwa ośrodki naukowe pracują lub podjęły próby pracy nad procesem toryfikacji biomasy. Jednym z nich była Politechnika Wroclawska, gdzie na wydziale Mechaniczno-Energetycznym zbudowano reaktor do toryfikacji biomasy. Lepszymi rezultatami w dziedzinie toryfikacji w Polsce może pochwalić się grupa naukowców z Politechniki Czestochowskiej, w której prowadzi się badania nad toryfikacją biomasy w Katedrze Inżynierii Energii. Wykorzystywany jest tam reaktor umożliwiający przeprowadzenie procesu autonomicznej karbonizacji biomasy (trociny, zrębki drzewne, słoma, wierzba energetyczna, mączka mięsno kostna, osady ściekowe i inne). Najważniejszym zadaniem reaktora jest utrzymanie optymalnych warunków przepływowych, aby w przestrzeni jego komory, w której dochodzi do reakcji toryfikacji, uzyskać maksymalną szybkość nagrzewu rozdrobnionej biomasy (ok. 280°C) tak by zainicjować reakcję egzotermiczną. Aby trwale i w sposób niezawodny utrzymać warunki przebiegu reakcji egzotermicznej, reaktor konstruuje się tak aby ograniczyć kontakt karbonizatu z gazami pirolitycznymi. Gazy, które opuszczają reaktor są spalane, ułatwia to kontrolę ich temperatury i stabilizuje pracę reaktora [A4]. Dodatkowym atutem tego typu konstrukcji reaktora jest specjalny układ suszenia i termolizy, w którym to można uzyskać dodatkowe ciepło z gorących

spalin opuszczających reaktor. Ilość tego ciepła zależy od zawartości wilgoci w podawanej biomacie.

Zgodnie z normami europejskimi, biowęgiel powinien być wytwarzana w procesie toryfikacji lub pirolizy biomasy (lub identycznego substratu) – obecnie trwają badania wraz z Instytutem Nawożenia i Gleboznawstwa IUNG w Puławach w zakresie zastosowanie biowęgla do nawozów i ich implementacja do gleb (projekt INNO-MIK, Lider XII). Do przeprowadzenia procesów toryfikacji i pirolizy wymagane jest zewnętrzne źródło ciepła, w celu utrzymania wymaganej temperatury w komorze reakcyjnej. Przeprowadzanie procesu toryfikacji biomasy z wykorzystaniem torgazu (części lotnych, które odparowują w trakcie procesu toryfikacji) w jest dobrze znane na rynku: wytwarzany gaz - torgaz w trakcie procesu toryfikacji są transportowane do komory reaktora, gdzie przepływają w wymienniku przeciwprądowym do biomasy podawanej do reaktor od góry. Otrzymany produkt chłodzi się i wprowadza do przenośnika ślimakowego od obszaru reaktora, w którym dochodzi do procesu toryfikacji. Podczas konwersji termiczno-chemicznej biomasy, najpierw wytwarzana jest para, a następnie gaz procesowy. Po odpyleniu mieszanki gazów spalinowych i lotnych produkty do toryfikacji kierowane są do komory spalania. Część gorących gazów spalinowych wytwarzanych podczas spalania torgazu jest zwracana do reaktora do toryfikacji, a nadmiar usuwa się do atmosfery przez kanał wylotowy. Uzyskanie odpowiedniej ilości torgazu wymaga dekompozycji dużej ilości biomasy, a co za tym idzie ostatecznej wydajności procesu jest niska i sam proces przestaje być opłacalny z ekonomicznego punktu widzenia. W innych rozwiązaniach wytwarzane jest ciepło do procesu toryfikacji ze spalania gazu ziemnego lub propanu, które mogą być stosowane w procesie toryfikacji natomiast w tym przypadku proces nie jest ani przyjazny dla środowiska, ani ekonomiczny, ponieważ wymaga zakupu gazów.

W ramach projektu BIOCARBON (Lider IX) udało się zaprojektować, wybudować i przebadac linię do toryfikacji biomasy w parze, które cechuje się nowymi rozwiązaniami stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań na świecie:

- Prawidłowe przygotowanie biomasy do prowadzenia procesu z optymalną kinetyką suszenia i toryfikacji - w sposób umożliwiający kontrolę przepływ biomasy w procesie i czas przebywania w reaktorze (w tym celu wykonano analizę procesów suszenia i toryfikacji wybranych do projektów typów biomasy wykorzystując analizę termogravimetryczną TG, DSC, TGA-FTiR, TG-MS oraz obliczenia analityczne parametrów kinetyki suszenia i toryfikacji). Niektóre surowce np. słoma kukurydziana jest trudna do zmielenia przy użyciu obecnie stosowanych metod. W trakcie projektu BICOARBON udało się opracować nową metodę wstępnego przygotowania wybranych biomas (mielenie i klasyfikacja);
- Opracowano technologię wytwarzania pary przegrzanej, a także układ do dokładnej kontrola ciśnienia i temperatury pary przegrzanej na cele technologiczne jak i układ sterowania procesem spalania w kotle parowym z możliwością kontrolowania współczynnikiem nadmiaru powietrza  $\lambda$  w czasie rzeczywistym;
- Optymalne wykorzystanie ciepła w procesie toryfikacji (wykorzystanie ciepła odpadowego z procesu kondensacji pary) do podgrzania wstępnego powietrza na suszenie biomasy w suszarce typu: „rolling-bed”;

- Opracowano założenia procesowe dla reaktora przeciwprądowego w celu optymalizacji czasu przebywania surowca w komorze toryfikacyjnej;
- Przeprowadzono badania parametrów procesowych pozwalających na określenie właściwości fizyko-chemicznych biomas pochodzących z różnych surowców i ich ocenę do różnych przeznaczeń jako: paliwa, biowęgiel (jako dodatku do nawozów organicznych), węgla aktywnego.

Tabela 1. Tabela przedstawiająca właściwości biomas nieprzetworzonej termicznie oraz zalety procesu toryfikacji biomas [A4]

Właściwości biomas nieprzetworzonej termicznie	Zalety procesu toryfikacji biomas
Wysoka zawartość wilgoci	Obniżenie zawartości wilgoci. Uwolnienie wodoru – wzrost ilości wodoru H <sub>2</sub> podczas zgazowania biomas
Wysoki stosunek H/C i O/C	Wzrost zawartości energii w jednostce masy (wykres van Krevelen). Odtlenienie i odwodornienie zachodzą stosunkowo szybciej niż dekarbonizacja, co prowadzi do zwiększenia zawartości węgla.
Podwyższona biodegradowalność	W wyniku procesu toryfikacji dochodzi do znacznego rozkład hemicelulozy, powszechnie uznawanej za najważniejsze źródło pożywienia dla rozwoju grzybów rozkładających drewno, co prowadzi do zwiększenia trwałości biomas.
Podwyższona higroskopijność	Zwiększa hydrofobowość. Toryfikowana biomas ma o 35% mniejszą zawartość wilgotności równowagowej (EMC), co pozwala na jej dłuższe przechowywanie na otwartej przestrzeni (obniżenie kosztów składowania), zmniejszone ryzyko rozpadu i utraty masy – podwyższona hydrofobowość.
Niska wartość opałowa i niska gęstość nasypowa	Dlatego też toryfikację stosuje się w celu usunięcia niepożądanych składników (H i O) z biomas, uzyskując wartości opałowe podobne do węgla (25- 35 MJ.kg <sup>-1</sup> ).
Niskie zdolności przemiałowe	Ściany komórkowe ulegają zniszczeniu, a pory stają się całkowitym wynikiem redukcji substancji lotnych. Toryfikacja zwiększa przemiałowość biomas, co jest niezbędne w dalszych zastosowaniach w energetyce zawodowej.

W pracy [A6] przedstawiono wyniki analizy elementarnej i analizy technicznej dla miskanta przed i po procesie toryfikacji. Z przeprowadzonych badań nad procesem toryfikacji miskanta wynika, iż zawartość pierwiastka C (masa) w toryfikatach z miskanta wzrasta wraz ze wzrostem temperatury procesu toryfikacji. Odwrótny trend jest widoczny dla zawartości pierwiastków H i O, które wykazywały tendencję spadkową. Z powyższego mechanizmu możemy wywnioskować, że podczas procesu toryfikacji miskanta ma miejsce odwodnienie, a także dekarbonizacja. To wyraźnie pokazuje, że zmniejszenie zawartości H i O w toryfikowanej biomasie będzie wynikać z emisji CO<sub>2</sub>, CO lub H<sub>2</sub>O. Rosnący procent zawartości C wynika ze spadku zawartości O.

Proces toryfikacji biomas polega na zmianie biomas, np. drewna, pelletu, słomy itp. na produkt o nowym składzie charakteryzujący się nowymi właściwościami fizyko-chemicznymi. W zawartych w autoreferacie badaniach nad procesem toryfikacji skupiono się w głównej mierze na dwóch z trzech najbardziej popularnych produktów rynkowych jakie można uzyskać: toryfikacji jako paliwie i toryfikacji jako nośniku pierwiastka węgla dodatku

do nawozów dla rolnictwa. Produkty różnią się ze względu na stopień toryfikacji i właściwości końcowe potwierdzone przez laboratoria certyfikowane (np. laboratoria pozwalające przebadać tzw. Fitotoksyczność biowęgla – maksymalną dawkę biowęgla do nawozu dla danej rośliny, przy poziomie której dana roślina wzrasta lepiej-wydajniejszy jest uzysk suchej masy z 1 hektara danej rośliny):

1. Biowęgiel jako dodatek do nawozów, odpowiedni dla rolnictwa i szklarni, poprawia właściwości gleby i zwiększenie wydajności plonów. Toryfikat ma również zdolność do określenia klasyfikacji gleby i remediacji gleby zanieczyszczonej np. kationami metali ciężkich. Nowy produkt procesu toryfikacji wymaga certyfikacji przez autoryzowane laboratorium. Ubytki biomas toryfikowanych na potrzeby dodatków do nawozów zostały oszacowane na poziomie 50% (jest to optymalny ubytek, który pozwala uzyskiwać odpowiednią ilość pierwiastka węgla przy jednoczesnym dobrym progu opłacalności wytwarzania biowęgla) w zrealizowanych badaniach własnych [A5, A6, A7, A8]

2. Toryfikat jako paliwo/blend paliwowy, wysokoenergetyczne paliwo odnawialne (do 26-28 MJ/kg), do wykorzystania jako źródło zasilania kotłów i układów kogeneracyjnych i trigeneracyjnych (energia elektryczna/ciepło/zimno) oraz zużycie indywidualne. W produkcji energii przemysłowej (kogeneracja/trigeneracja) wykorzystanie biopaliw jest obecnie bardzo opłacalne. Kogeneracja lub trigeneracja wymaga wytwarzania przegrzanej pary. W wyniku zrealizowanego projektu BIOCARBON pozyskano wiedzę na temat warunków prowadzenia procesu toryfikacji w parze i w kolejnym projekcie BioTrainValue (analizy techno-ekonomiczne układów do toryfikacji biomas w parze) zamierza opracować założenia procesowe i lokalizacyjne (analiza łańcuchów dostaw) i zaoferować małe systemy produkcji energii odnawialnej, o mocy do kilku MW, o wysokiej wydajności i opłacalności ekonomicznej w celu wytwarzania toryfikatów jako paliwa i substytut dla węgla kamiennego dla krajowych MPEC – Miejskich Przedsiębiorstw Energetyki Ciepłej zasilanych węglem kamiennym – w lokalizacjach, w których analiza ekonomiczna będzie wskazywała na opłacalność budowy takiej instalacji.

3. Węgiel aktywny biosorbenty - produkt o wysoko rozwiniętej powierzchni adsorpcyjnej, stosowany w procesach adsorpcji w różnych zastosowaniach. Produkt powstały w wyniku głębokiej toryfikacji (piroliza). Badania nad wytwarzanymi biosorbentami z biomas: słoma z kukurydzy nie wykazały odpowiednio wysokiego poziomu adsorpcji metali ciężkich w porównaniu do stosowanych konwencjonalnie węgli aktywnych wytwarzanych z paliw kopalnych. Miskantus oraz z Oxytree jako biosorbenty wykazały efektywność usuwania rtęci i dwutlenku węgla ze spalin powstałych podczas spalania węgla brunatnego. Jony metali i halogenów zawarte w biosorbentach pełnią rolę efektywnych miejsc aktywnych, co wpływa na skuteczność usuwania rtęci. W mniejszym stopniu, niż w przypadku usuwania rtęci, badane biosorbenty były skuteczne w usuwaniu CO<sub>2</sub> ze spalin.

Innowacyjność w kontekście wyselekcjonowanych do badań produktów opiera się na fakcie, że substraty pochodziły z odpadów, w dużej mierze z biomasy, takiej jak słoma z owsa, słoma z kukurydzy, biomasa drzewna z przycinki lasów i biosusz z oczyszczalni ścieków, która



nie jest wykorzystywana przez konkurencyjne ośrodki naukowe i firmy z branży konwersji paliw. Słoma kukurydziana nie jest zwykle odzyskiwana podczas zbioru zbóż, ale jest zaorana. Jeśli jest proponowany do sprzedaży, jest obecnie najtańszą dostępną biomasa (150 PLN za tonę). Obecnie biowęgiel ze słomy kukurydzy nie jest dostępny na rynku światowym na skalę przemysłową.

W pracach [A3, A4] zawarto analizę porównawczą szeregu różnych rodzajów reaktorów do przeprowadzania procesów toryfikacji i pirolizy biomas jak i odpadów. Analiza ta miała za zadanie pomóc w doborze danego typu reaktora i danego rodzaju procesu do danego typu biomasy, która miała by zostać poddana konwersji na potrzeby wytwarzania paliwa stałego lub dodatku do nawozu w formie biowęgla. Celem tej analizy wybranych parametrów technicznych i rozwiązań konstrukcyjnych miało być wsparcie np. grupy rolników, którzy mogliby zapoznać się z możliwościami jakie niosą ze sobą procesy pirolizy i toryfikacji tak aby technologie te były powszechniej stosowane (istnieje dużo zapotrzebowanie rynkowe na reaktory do toryfikacji co wynika z analiz rynkowych jak i z własnych kontaktów z potencjalnymi odbiorcami technologii toryfikacji). Potrzeba praktycznego stosowania procesu toryfikacji przez taką grupę jak rolnicy uległ również znacznemu wzmocnieniu z powodu wojny na Ukrainie i drastycznej podwyżce cen gazu i ropy.

Jakość wytworzonego w wyniku procesu toryfikacji biowęgla zależy w głównej mierze od sposobu prowadzenia procesu toryfikacji: temperatury procesu, czasu przebywania w komorze reaktora, sposobie dostarczania ciepła do procesu czy też metodzie wychładzania gotowego toryfikatu. Ten obszerny przegląd należy traktować jako przydatny zestaw narzędzi dla rolników, właścicieli zakładów celulozowo-papierniczych i innych zakładów przemysłowych wykorzystujących biomasę jako substrat do produkcji biopaliwa.

W pracy dokonano podziału reaktorów do procesu toryfikacji dzieląc je na dwie kategorie w zależności od mechanizmu wymiany ciepła, obejmujące ogrzewanie bezpośrednie i pośrednie. W reaktorach z ogrzewaniem bezpośrednim ciepło przekazywane jest do biomasy poprzez bezpośredni kontakt z gorącymi mediami. Aby uniknąć utleniania biomasy podczas toryfikacji, gorące media są kontrolowane w celu utrzymania środowiska beztlenowego lub o ograniczonej zawartości tlenu. Przykładami mediów grzewczych są: przegrzana para, gazy spalinowe, gorące ciała stałe i fale elektromagnetyczne. Ogrzewanie bezpośrednie można stosować w reaktorach ze złożem stałym, bębniem obrotowym, złożem fluidalnym, złożem ruchomym i reaktorami mikrofalowymi. Ciepło przekazywane jest przez ścianę reaktora do biomasy w procesie ogrzewania pośredniego. Dzięki tej metodzie można łatwo kontrolować ilość tlenu w reaktorze. Ogrzewanie pośrednie można zastosować w reaktorach ze złożem stałym, śrubowych i bębnach obrotowych. Przeprowadzona analiza porównawcza reaktorów do procesu toryfikacji pokazuje, że koszty budowy jednostek z ogrzewaniem bezpośrednim są wyższe niż jednostki z ogrzewaniem pośrednim ze względu na koszt wymiennika ciepła z gazem obojętnym, wytwornicy pary przegrzanej, sprężarki gazu obojętnego, separatora cząstek stałych i generatora mikrofal. Reaktor ze złożem fluidalnym ma skomplikowaną budowę jest bardzo trudny w obsłudze, dlatego też w projekcie BIOCARBON (Lider IX) zdecydowano się na zastosowanie stosunkowo prostej konstrukcji w formie reaktora przeciwprądowego ze ślimakiem o licznej perforacji co miało za zadanie zintensyfikowanie wymiany ciepła i poprawienie kontaktu pomiędzy toryfikowaną biomasą a parą przegrzaną. Reaktory z ogrzewaniem pośrednim są łatwiejsze w obsłudze i mają prostszą konstrukcję. Główną wadą

reaktorów z ogrzewaniem pośrednim jest to, że przy znacznej grubości złoża biomasy rozkład ciepła staje się nierównomierny i wymaga dużej powierzchni wymiany ciepła, aby było ono równomierne. Powoduje to duże zapotrzebowanie na przestrzeń i wysokie koszty budowy. Reaktor z pośrednim dostarczaniem ciepła na cele procesu toryfikacji ze złożem stałym ma najniższy koszt budowy, ponieważ nie zawiera ruchomych części ani specjalnych elementów.

Proces toryfikacji biomasy o wysokiej zawartości wilgoci jak osad ściekowy nie jest najlepszym rozwiązaniem ze wszystkich obecnie opracowywanych metod konwersji termiczno-chemicznych, ponieważ do toryfikacji wymagane jest suszenie wstępne i duże nakłady energetyczne i nie jest przez to ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem w porównaniu np. do hydrotermicznej karbonizacji osadów. Istnieją dwie drogi konwersji paliw o wysokiej zawartości wilgoci: (I) pierwsze z nich to wykonywanie blendów (mieszanek) z biomasami o niższej zawartości wilgoci jak na przykład biomasa drzewna lub biomasa pochodzenia rolniczego lub (II) poddanie osadów ściekowych procesowi hydrotermicznej karbonizacji (proces jest prowadzony w niższym zakresie temperatur: od 195-230 °C i ciśnienie ok. 20 bar w atmosferze wody), proces ten daje bardzo obiecujące wyniki dla substratów o podwyższonej zawartości wilgoci jak: odpady z wytwórni kartonów, skórki z pomarańczy czy wytloki z oliwek (projekt F-Cubed, Horyzont Europa).

### **Uzyskane rezultaty**

- Na podstawie wyników studium przypadku dla wytworzonej w ramach zrealizowanego projektu BIOCARBON instalacji do toryfikacji biomasy parą przegrzaną stwierdzono, że wykorzystanie biomasy z odpadów z biogazowni jako źródła energii może wynosić od 3,64% do 4,26% całkowitego zużycia energii w Turcji i Polsce w postaci energii z biowęgla. W drugim studium przypadku badane jest inne wykorzystanie pofermentu jako nawozu mineralno-organicznego. Zgodnie z wynikami studium przypadku wykorzystanie przefermentowanej biomasy jako źródła nawozów mineralnoorganicznych może potencjalnie wyprodukować około 16 142 806 ton i 9 648 142 ton nawozów mineralno-organicznych odpowiednio dla Turcji i Polski. W końcu studia przypadków i obliczenia pokazują, że ilość produkowanego pofermentu jest nie do pominięcia.
- Ze względu na dużą różnorodność biomas oraz różnice w ich budowie strukturalnej a co za tym idzie we właściwościach fizyko-chemicznych biomasy należy waloryzować w specjalnej dedykowanych aparatach – reaktorach, które muszą być tak zaprojektowane aby proces toryfikacji danego typu biomasy przebiegał w sposób kontrolowany i opłacalny ekonomicznie [A3, A4, A5, A6, A7, A8].
- Istnieje szereg materiałów odpadowych takich np. jak odpady kolejowe z drewna, które można zagospodarować poprzez proces toryfikacji jako paliwa odnawialne co zostało udowodnione w pracy [A1]. Ponadto proces toryfikacji w niskiej temperaturze powoduje, że podłoże kolejowe po obróbce termicznej charakteryzuje się wyższym ciepłem spalania w porównaniu do drewna, z którego otrzymano bazę. Dzieje się tak na skutek zwiększonej koncentracji węgla pierwiastkowego w biomasie. Przeprowadzenie neutralizacji termicznej w temperaturze 40°C pozwala na zatrzymanie w karbonizacji około 75% energii chemicznej biomasy, przy jednoczesnej zmianie ciężaru podkładów o niecałe 50%. Metoda ta pozwala na produkcję paliwa o ciepłe spalania porównywalnym z ciepłem spalania węgla kamiennego [A1].

- W artykule [A2] podsumowano wyniki modelowania numerycznego współspalania słomy z kukurydzy przed jak i po toryfikacji parą oraz węgla kamiennego przy udziałach biomasy do węgla 20, 30 i 40% w kotle pyłowym OP-230. Z przeprowadzonych badań wynika, że współspalanie storyfikowanej słomy z kukurydzy na oddzielnych palnikach znacząco wpływa na obciążenie cieplne ścian kotłów, nieznacznie zwiększając emisję CO i NO oraz utratę niespalonego węgla. Analiza zachowania się podczas spalania mieszanek biomasa/węgiel określona podczas TGA i oceniona na podstawie obliczeń wskaźników spalania pozwoliła wysunąć wniosek, że przyszłe prace powinny koncentrować się na badaniu współspalania toryfikowanej biomasy z węglem we wstępnie zmieszanej mieszanki paliwowe.
- Proces toryfikacji biomasy z wykorzystaniem pary wydaje się na ten moment najtańszym z dostępnych rozwiązań zwłaszcza, gdy instalacja do toryfikacji biomasy jest zainstalowana w pobliżu źródła ciepła odpadowego w postaci pary np. przy instalacjach do produkcji bioetanolu z ziaren kukurydzy (zagospodarowanie odpadów z kukurydzy jak: kolba, słoma z kukurydzy), przy tartakach, wytwórniach papieru lub zakładach metalurgicznych [A9].
- Badania w zakresie wytwarzania biosorbentów w wyniku toryfikacji nie będą kontynuowane, ponieważ biosorbenty nie wykazały odpowiednio dobrych właściwości sorpcyjnych dla metali ciężkich jak rtęć w porównaniu do rynkowo stosowanych węgla aktywnych wytwarzanych z paliw kopalnych – wyniki projektu realizowanego wspólnie z AGH (Lider X).

## Wnioski

Na podstawie wskazanych powyżej rezultatów można stwierdzić, iż proces toryfikacji biomasy posiada bardzo duży potencjał aplikacyjny zwłaszcza w energetyce zawodowej jako paliwo odnawialne o podwyższonej kaloryczności i substytut węgla kamiennego [A2, A5, A6, A7, A8, A10]. Przeprowadzone badania wykazują, iż kluczowym elementem pozwalającym w sposób ekonomicznie opłacalnym wykorzystać do procesu toryfikacji dany rodzaj biomasy jest oprócz jego właściwości fizyko-chemicznych dostępność i koszty pozyskania. Sam proces toryfikacji, jego sposób prowadzenia (temperatura procesu, czas przebywania w reaktorze) decyduje w dużej mierze o możliwościach zastosowania danego toryfikatu do danego przeznaczenia (ubytki masy zbliżone 50% są właściwymi dla produkcji biowęgla, nośniki węgla jako dodatki do nawozów organicznych [A5, A6, A7] natomiast ubytki zbliżone 30% to toryfikaty jako paliwa stałe dla energetyki zawodowej – najlepszy stosunek H/C i strata części lotnych oraz koszty wytworzenia [A2, A8]). Dalsze badania w zakresie procesu toryfikacji w parze będą skupiały się na toryfikacji z wykorzystaniem katalizatorów takich jak katalizatory zeolitowe, które będą intensyfikowały ilość wytwarzanych cennych produktów ubocznych takich jak kwas propionowy czy kwas lewulinowy - substancja chroniąca skórę i włosy, stosowany także w kosmetykach jako konserwant, kwas o słodkim smaku, kremowy i maślane zapach, który stosuje się do utworzenia kompozycji zapachowych karmelu, toffi i klonu. (grant NCN konkurs OPUS w ocenie).

## II cel szczegółowy

Przeprowadzono analizę kinetyki procesu toryfikacji wybranych biomas: słoma z kukurydzy, słoma z owsa – opis wyników został zawarty w mojej pracy [A8], miskanta [A6], sosny i osadów z oczyszczalni ścieków [A5]. Proces toryfikacji zostały zastosowany w celu zaprojektowania instalacji do toryfikacji powyższych biomas w skali pilotażowej (projekt BIOCARBON) i zastosowanie pary przegrzanej [A2, A9] aby wyprodukować toryfikaty do 3 różnych przeznaczeń: paliwo stałe dla energetyki zawodowej – wyniki zostały zawarte w pracy dotyczącej współpalania toryfikowanej słomy z kukurydzy z węglem kamiennym [A2], biowęgiel jako dodatek do nawozów dla rolnictwa [A5, A6, A7, A8], biosorbenty do wychwytywania metali ciężkich ze spalin (publikacje wspólne z dr Marczak AGH).

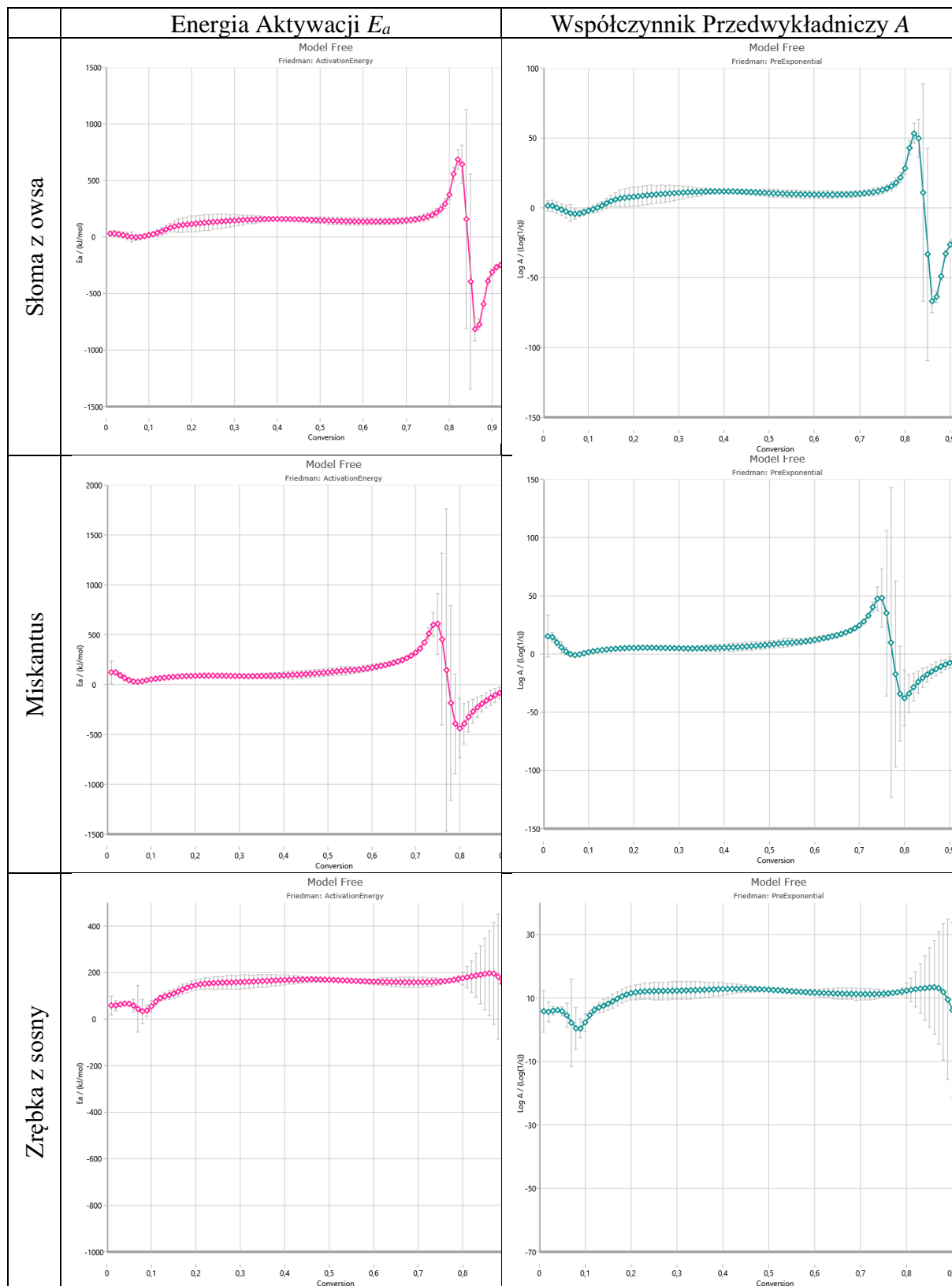
Badania nad procesem kinetyki biomas zostały wykonane z wykorzystaniem analizatora termogravimetrycznego Netzsch TG 209 F3 jak i z Luxx 409 PG Netzsch połączonym ze spektrometrem mas QMS 403D Aeolos Netzsch (analiza TG-MS [A8]) oraz z zastosowanie oprogramowania Netzsch Neo Kinetics.

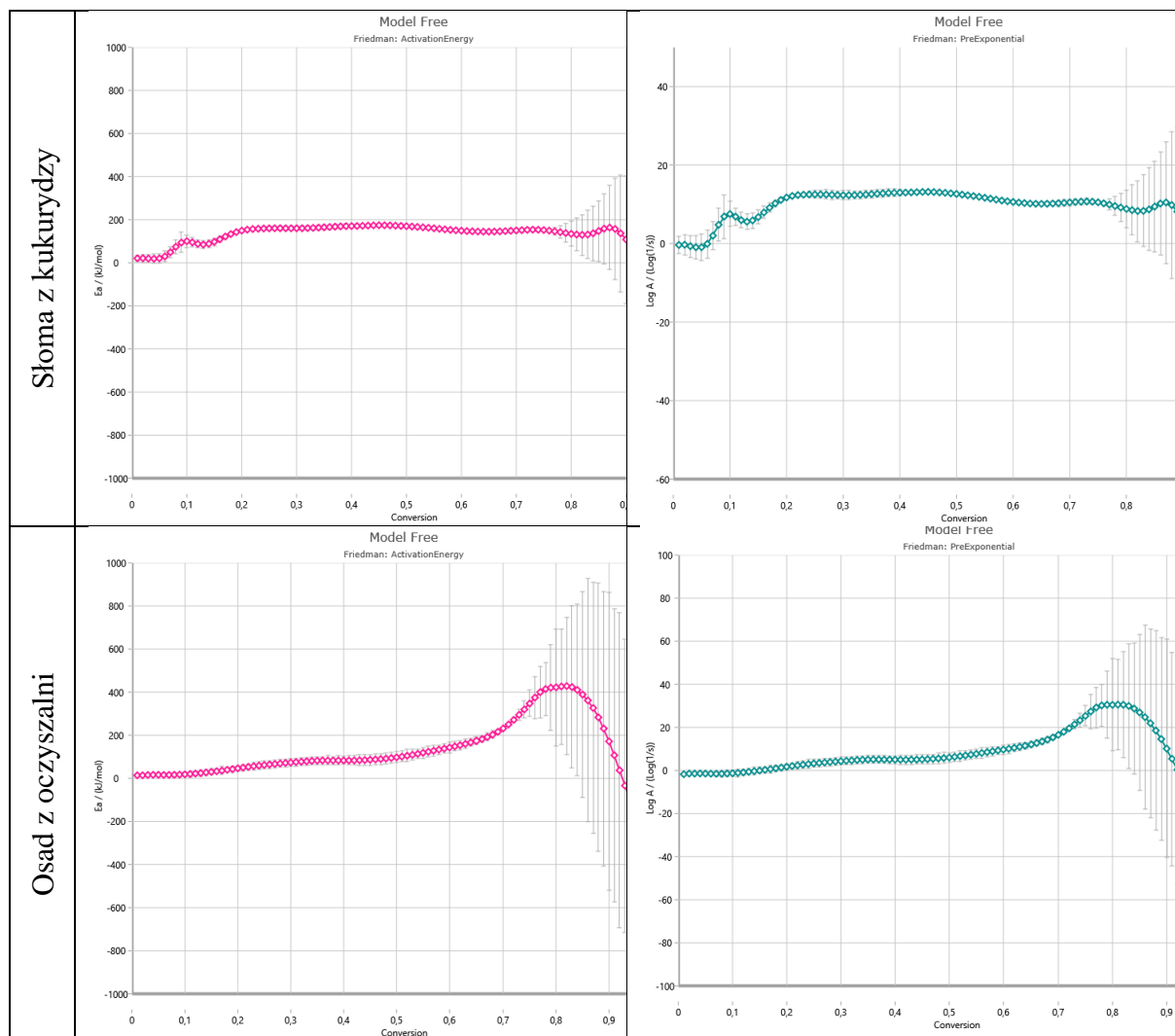
Istnieje kilka metod wyznaczania parametrów kinetycznych takich procesów konwersji biomasy jak toryfikacja czy piroliza, wśród nich należy wymienić te metody, które są najczęściej stosowane do wyznaczania energii aktywacji czy współczynników pre-ekspotencjalnych: metoda Friedmana, Ozawa-Flynn-Wall, Kissinger-Akahira-Sunose, Vyazovkin.

Kinetyka procesu toryfikacji biomas była wyznaczna głównie przy zastosowaniu trzech dostępnych modeli kinetycznych (Kissinger, Friedmann i metoda Ozawa Flynn-Walla), w tym kluczowej (najbardziej precyzyjnej według wyników prac [A5, A6, A8]) w przypadku otrzymanych wyników metodzie: (2) Analiza Friedmana, która jest metodą analizy kinetycznej obliczającą zależność energii aktywacji  $E(\alpha)$  od stopnia konwersji  $\alpha$ . Analiza Friedmana należy do grupy metod izokonwersji różniczkowych, gdzie w pierwszej kolejności należy znaleźć pochodną z głównego równania kinetycznego (1), a następnie obliczyć logarytm, zestawienie wyników Tabeli 2 – opracowanie własne.

W oparciu o przeprowadzone badania nad procesem toryfikacji z wykorzystaniem analizy termogravimetrycznej wyliczono parametry kinetyczne procesu toryfikacji dla 5 biomas. W Tabeli 2 umieszczono wyniki badań otrzymane na podstawie analizy termogravimetrycznej krzywych TG otrzymanych w funkcji temperatury, wykorzystując program Netzsch Neo Kinetics 3, podjęto próbę matematycznego dopasowania jednego z modeli reakcji rozkładu termicznego. Biorąc pod uwagę założony model reakcji, wyznaczono parametry kinetyczne, tj. stałą prędkości (współczynnik przedwykładniczy)  $A$  oraz energię aktywacji  $E_a$ , a także współczynnik dopasowania  $R^2$  [A5, A6, A8].

Tabela 2. Parametry kinetyczne (Energia Aktywacji  $E_a$  i Współczynnik Preskpotencjalny  $A$ ) procesu toryfikacji biomasa otrzymane metodą Friedmana – Netzsch Neo Kinetics (wersja 2.6.7.8) (słoma z owsa, Miskantus, zrębka z sosny, słoma z kukurydzy, osad z oczyszczalni ścieków) :

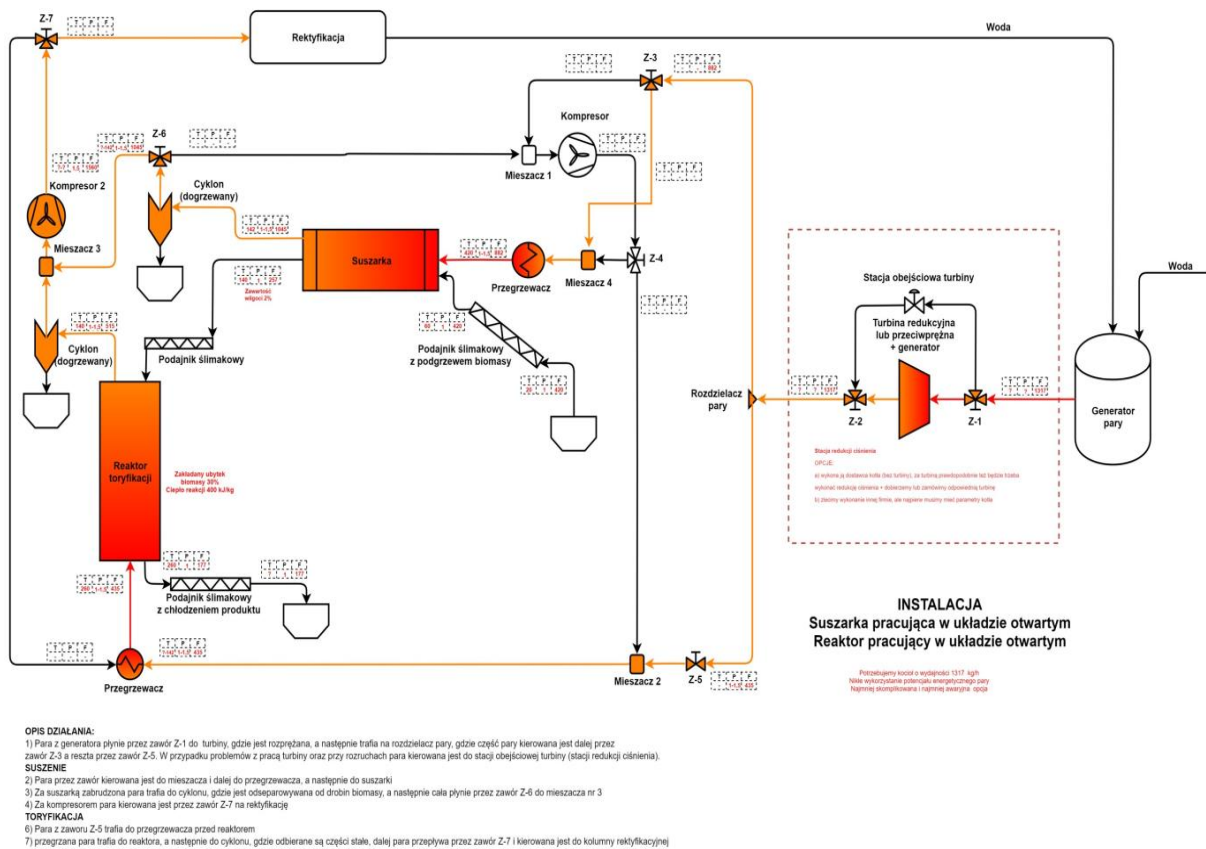




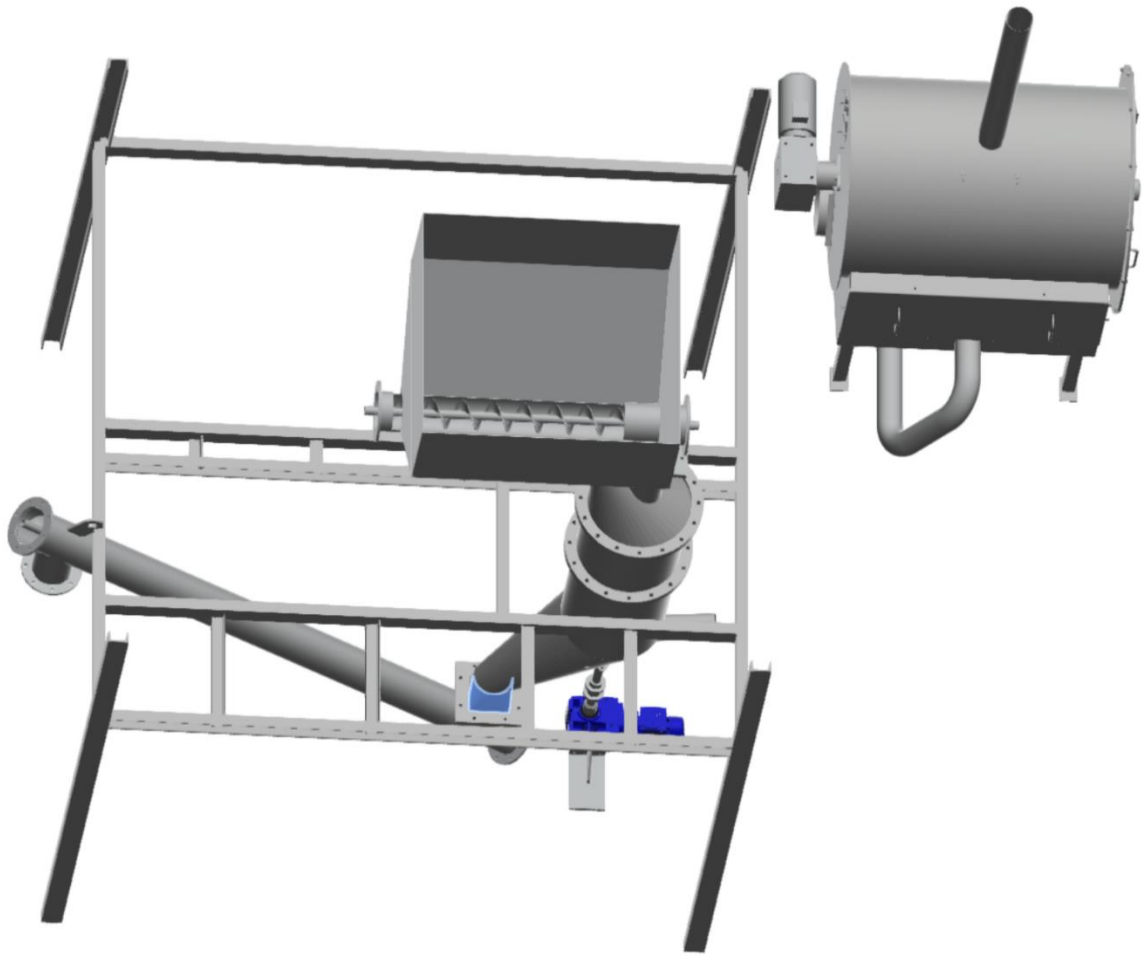
W oparciu o przeprowadzoną analizę kinetyki procesu toryfikacji wybranych biomas (sosna, Miskantus, słoma z owsa, słoma z kukurydzy, osad ściekowy) oraz obliczenia bilansowe dla biomas i pary z wykorzystaniem programu Matlab dokonano obliczeń projektowych dla poszczególnych aparatów wchodzące w skład instalacji do toryfikacji biomasy, w tym: suszarkę obrotową typu „rolling-bed” wykorzystującą powietrze i reaktor przeciwprądowy do toryfikacji biomas w parze.

W pracy [A2], w której znajdują się wykonane badania eksperymentalne nad procesem toryfikacji słomy z kukurydzy i model numeryczny procesu spalania toryfikowanej biomasy na cele energetyczne [A2] został wytypowany pył węgla kamiennego (*SBC*) pochodzący z kopalni KWK Murcki-Staszic (województwo śląskie), natomiast biomasa w postaci słomy z kukurydzy (*TMS*) została zebrana z gospodarstwa agro w Uniejowie (Polska, województwo łódzkie). Biomase wysuszono wstępnie do zawartości wilgoci 10% w suszarce obrotowej typu „rolling-bed”, a następnie dostarczono do reaktora przeciwprądowego, w którym para przegrzana poddawana jest działaniu ciśnienia 2 barów. Instalacja do toryfikacji biomasy za pomocą pary została opisana w pracy [A9]. Z układu reaktora przeciwprądowego Rysunek 1 pobrano próbki poddanego toryfikacji materiału w zakresie wielkości do 20 mm zgodnie z normą ISO 18135:2017-06. Przed analizą fizykochemiczną próbki zmielono i przesiano do wielkości

poniżej 200  $\mu\text{m}$  zgodnie z normą PN-G-04502:2014-11 w przypadku węgla oraz ISO 14780:2017-07/A1:2020-03 dla biomasy torfikowanej. Analizę przybliżoną i ostateczną przeprowadzono zgodnie z normami europejskimi, wewnętrznymi procedurami testowymi i sprzętem analitycznym.



Rysunek 1. Schemat istniejącej instalacji na Politechnice Łódzkiej (Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska) do torfikacji biomasy w parze z elementami planowanymi do rozbudowy (turbina i rektyfikator).



Rysunek 2. Projekt 3D (Autodesk Inventor) istniejącej instalacji na Politechnice Łódzkiej (Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska) do torfikacji biomasy – połączenie suszarki obrotowej „rolling-bed” pracującej na gorące powietrze z reaktorem przeciwbieżnym na parę.

Na Rysunku 2 i 3 przedstawiono istniejącą instalację na Politechnice Łódzkiej (Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska) do torfikacji biomasy – połączenie suszarki obrotowej „rolling-bed” pracującej na gorące powietrze z reaktorem przeciwbieżnym na parę. Gorące powietrze do procesu suszenia biomasy w suszarce podgrzewane jest z powietrza z na ekonomizerze dodatkowym ciepłem pochodzącym z kondensacji pary.





Rysunek 3. Instalacja pilotażowa o wydajności 50 kg/h do torfikacji biomasy drzewnej i biomasy rolniczej w parze przegrzanej opracowana w ramach projektu Lider IX – BIOCARBON.

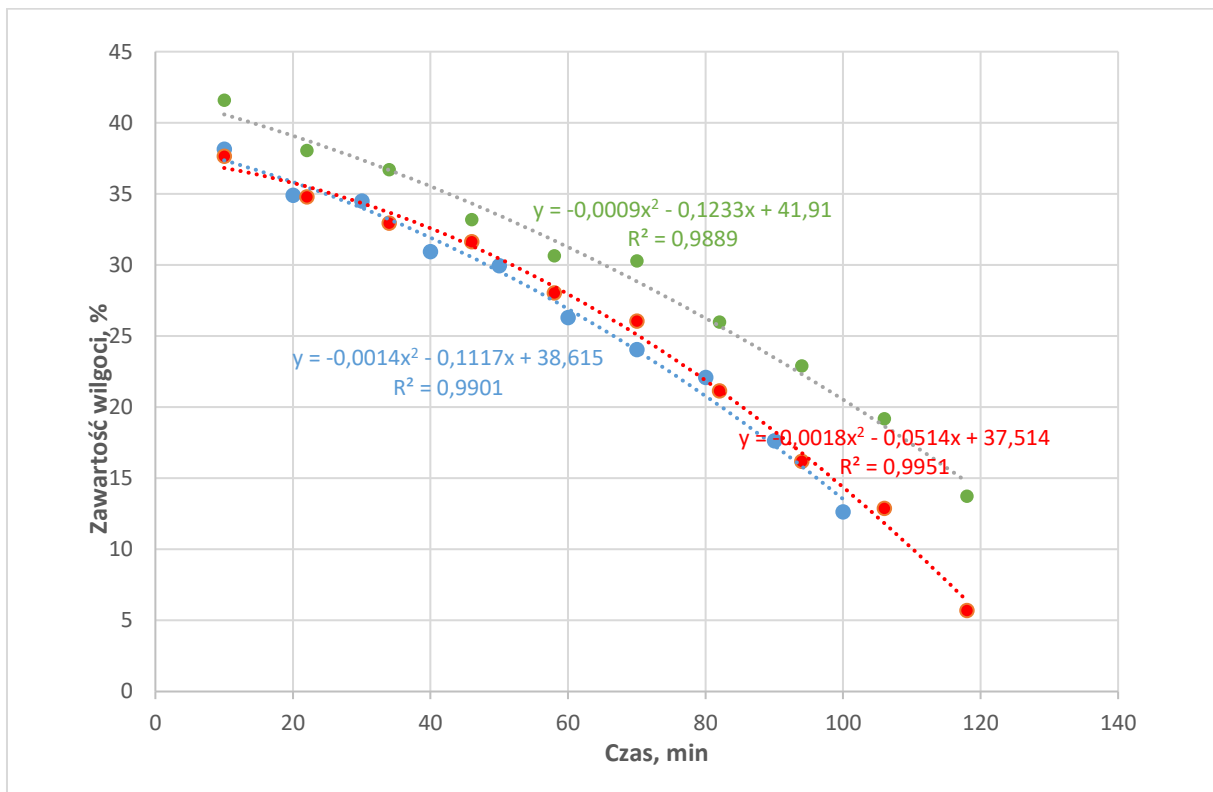
### Uzyskane rezultaty

Suszenie biomasy w suszarce typu „rolling-bed” z wykorzystaniem zaprojektowanej w projekcie Lider BIOCARBON instalacji do torfikacji biomasy.

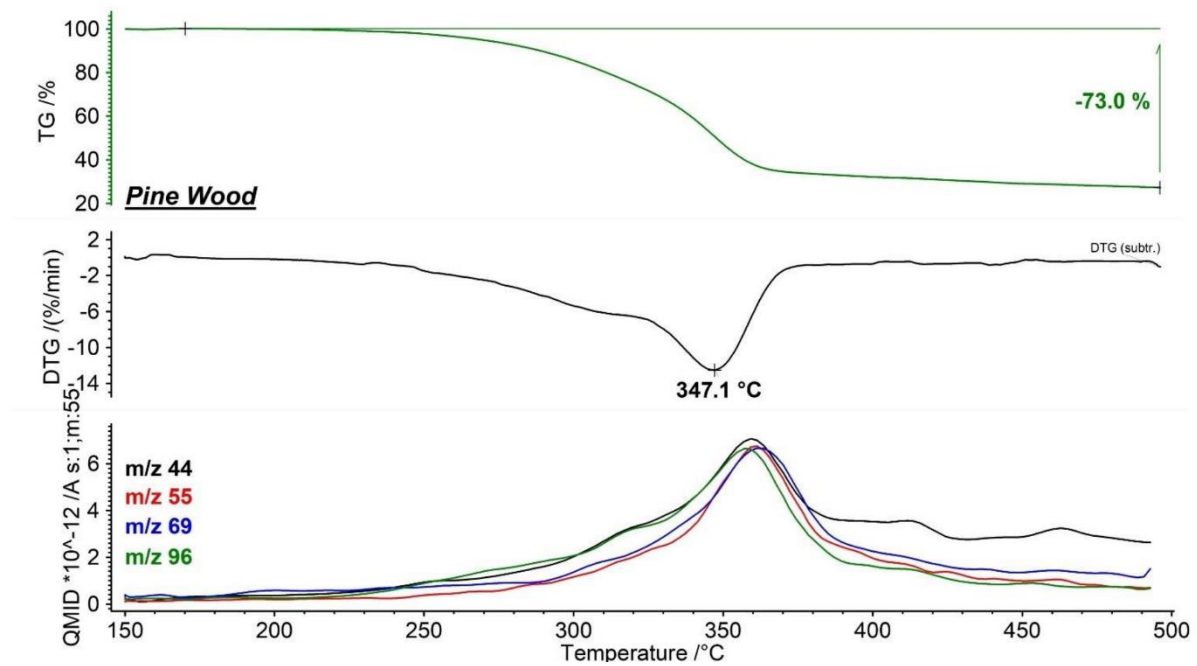


Rysunek 4. Suszarka biomasy obrotowa typu „rolling-bed” zaprojektowana podczas realizacji projektu BIOCARBON - Lider IX.

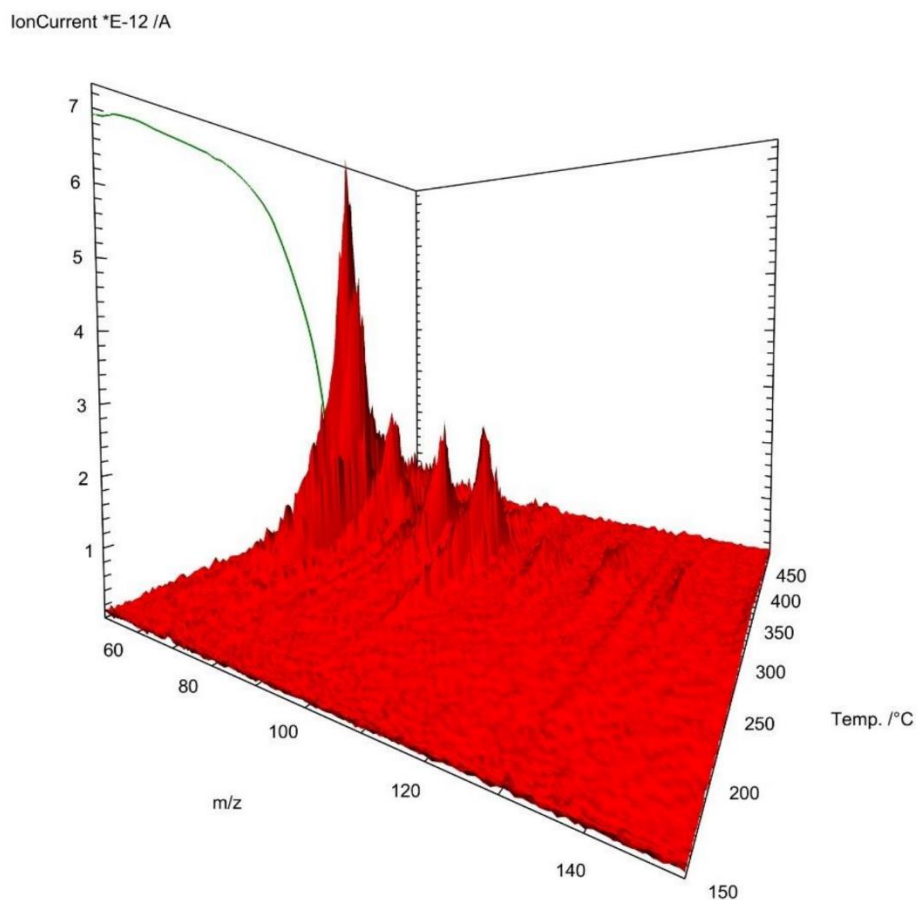
Wyniki badań nad procesem suszenia biomasy drzewnej w suszarce zaprojektowanej w projekcie BIOCARBON zostały zaprezentowane podczas międzynarodowej konferencji Eurodrying 2023, która odbyła się w Łodzi w lipcu 2023 roku. Na rysunku przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań nad suszeniem biomasy drzewnej wykonane podczas projektu BIOCARBON dla biomasy drzewnej – sosna. Badania suszenia były wykonane z wykorzystaniem oznaczania zawartości wilgoci metodą suszarkową. Wyznaczono krzywe suszenia wykonano dla 3 prób biomasy drzewnej o wysokiej zawartości wilgoci – 37-42% zawartości wilgoci na wejściu do suszarki. W drugiej kolejności opracowano model matematyczny suszarki (poniżej przedstawione wyniki będą w najbliższym czasie publikowane w specjalnym wydaniu czasopisma DRYING).



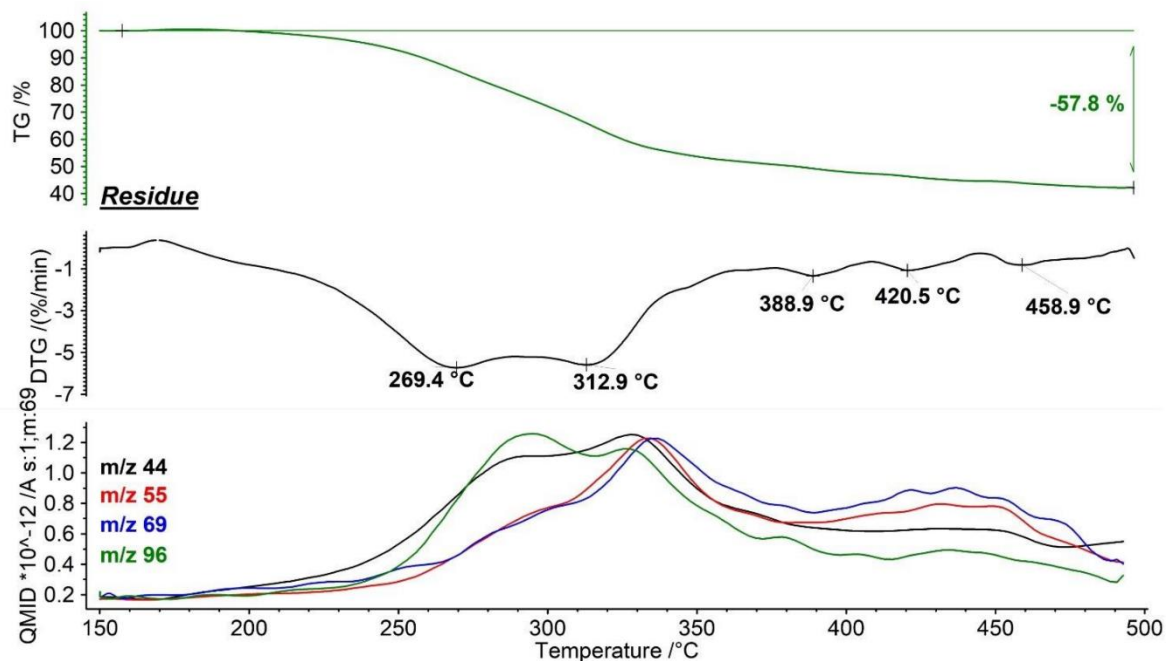
Rysunek 5. Suszenie biomasy drzewnej (3 próby) w suszarce typu: „rolling-bed”, oznaczanie zawartości wilgoci metodą suszarkową – projekt BIOCARBON Lider IX.



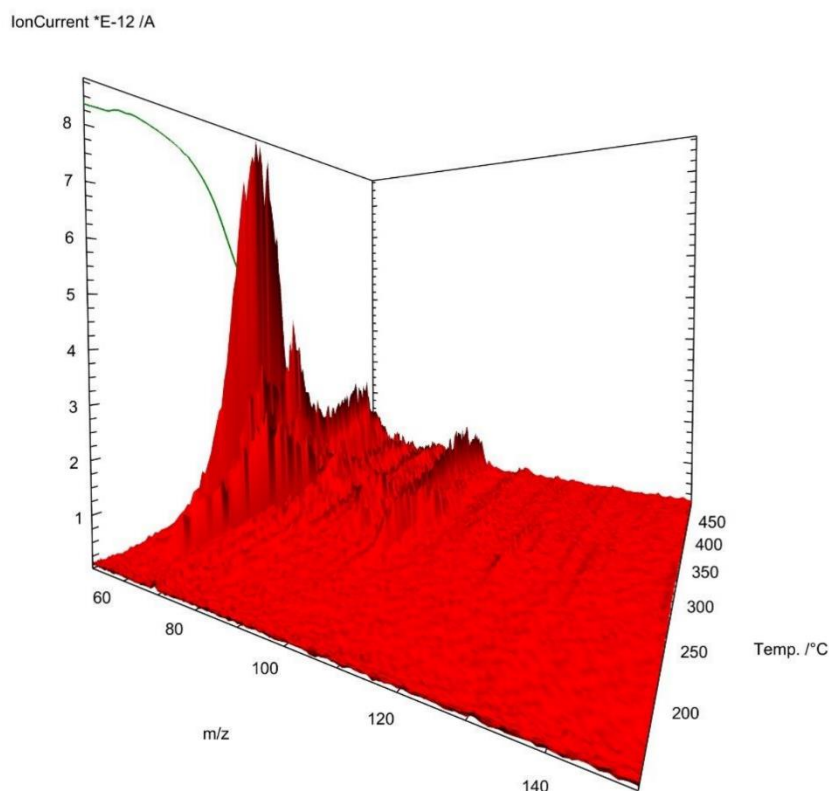
Rysunek 6. Ubytek masy w funkcji temperatury (krzywa TG) i krzywe prądu jonowego masy numery 44, 55, 69 i 96 podczas torfikacji w parze– projekt BIOCARBON Lider IX.



Rysunek 7. Ubytek masy w funkcji temperatury (zielona krzywa TG) i profil odgazowania 3D próbki drewna sosnowego (zakres mas od 50 do 150 amu) podczas torfikacji w parze– projekt BIOCARBON Lider IX.



Rysunek 8. Ubytek masy w funkcji temperatury (krzywa TG) i krzywe prądu jonowego masy numery 44, 55, 69 i 96 podczas toryfikacji w parze– projekt BIOCARBON Lider IX.



Rysunek 9. Ubytek masy w funkcji temperatury (zielona krzywa TG) i profil odgazowania 3D próbki osadu ściekowego (zakres mas od 50 do 150 amu) podczas toryfikacji w parze– projekt BIOCARBON Lider IX.

Na rysunkach 6-9 przedstawiono wyniki analizy termogravimetrycznej toryfikacji zrębki sosny w parze wykonane podczas realizacji projektu BIOCARBON – Lider IX

(nieopublikowane). Dodatkowo wykonano analizy procesu toryfikacji w parze dla pozostałych biomas: miskanta, słomy z kukurydzy [A2], słomy z owsa, osadu ściekowego. Wszystkie próbki wykazały podobny efekt pod względem zachowania termicznego, w którym dominuje szeroka utrata masy w temperaturze od 200 do 400 °C. Jednakże, wielkość ubytku masy jest różna dla wszystkich próbek. Podczas gdy dla biomasy drzewnej (sosna, miskant) i biomas pochodzenia rolniczego (słoma z owsa i słoma z kukurydzy) dość łatwo przekracza utratę masy o ponad 65%, to ubytek masy dla osadu ściekowego – Rysunek 12 i 13 produkty stałe wynosiły tylko nieznacznie mniej niż 60%. Analizy te wykazały mniejszą zawartość substancji organicznych w toryfikowanym osadzie ściekowym w stosunku do pozostałości w analizowanych pozostałych 4 biomasach. Poza tym próbki z osadem ściekowym wykazały również małe, wyraźne etapy utraty masy powyżej 400 °C, które nie występują w przypadku innych próbek w podobnej ilości. Wszystkie toryfikowane w parze 5 próbek biomas wykazały uwalnianie większych substancji organicznych cząsteczek podczas głównego etapu rozkładu.

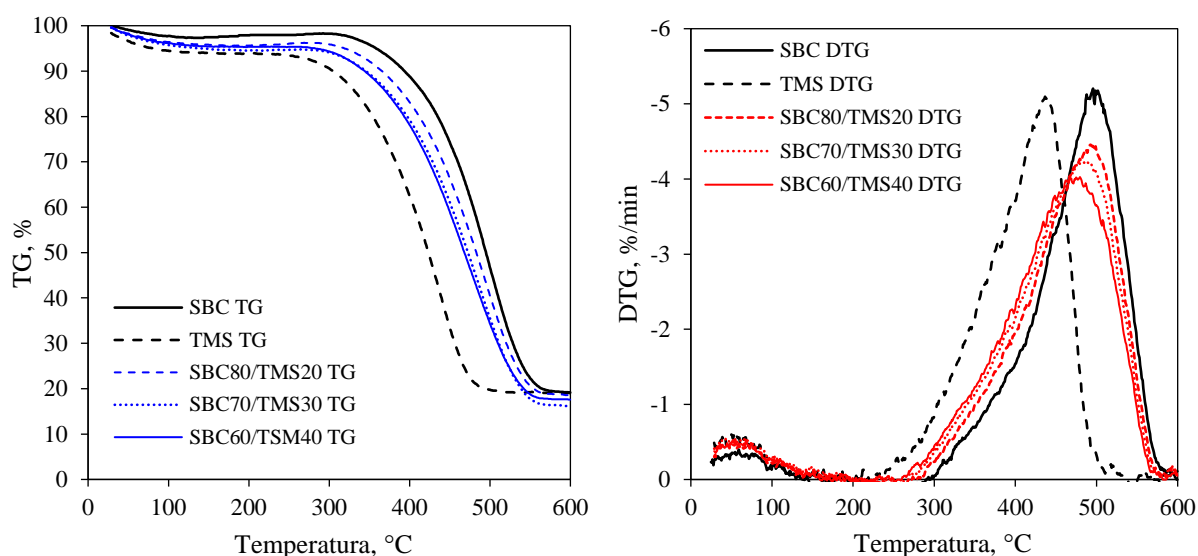
Różnicowe krzywe termogravimetryczne *DTG* pokazane Rysunki 9-11 potwierdzają zmiany właściwości fizyko-chemicznych, którym uległa słoma z kukurydzy podczas toryfikacji w reaktorze przeciwprądowym z wykorzystaniem pary. W profilu *DTG* występuje jeden dominujący pik dla obu paliw (dla węgla i dla toryfikatu słomy z kukurydzy), wynikający z dużego udziału węgla stałego w składnikach lotnych (wzrost udziału pierwiastka węgla w wyniku toryfikacji biomasy). Podobne wyniki dla różnych typów toryfikowanej biomasy zaobserwowali inni autorzy [A2]. Jednak szczyt na krzywej *DTG* dla *TMS* jest przesunięty w stronę niższych temperatur, co wskazuje, że paliwo to jest bardziej reaktywne, pomimo widocznego uwęglenia. Z wyliczonych współczynników dla spalania toryfikatu z węglem wynika, że temperatura zapłonu dla *TMS* jest o około 64 °C niższa niż dla *SBC* i podobnie temperatura wypalenia jest o około 74 °C niższa. Obniżenie tej ostatniej temperatury w przypadku *TMS* może świadczyć o zmniejszeniu obecności ubytków niespalonego węgla w popiele paleniskowym kotła.

Oszacowane wskaźniki spalania potwierdzają powyższe i wskazują, że paliwo *TMS* zapala się łatwiej (wyższe  $D_i$ ), pali się intensywniej (wyższe  $S$ ) przy lepszej stabilności spalania (wyższe  $C$ ) w porównaniu do paliwa *SBC*. Generalnie *TMS* wykazuje wyższą aktywność spalania w porównaniu z węglem, na co wskazuje wskaźnik  $C$ . Jednakże wskaźniki spalania węgla z dodatkiem toryfikowanej biomasy dostarczają bardziej istotnych informacji z użytkowego punktu widzenia. Dodatek silnie uwęglonej biomasy do węgla nieznacznie poprawia parametry zapłonu ( $D_i$  dla *TSM* ok. 0,21%/min<sup>3</sup> vs 0,18 dla *SBC*) bez zakłócania stabilności spalania (podobna wartość  $C$ ), ale przy mniejszej prędkości spalania, na co wskazuje znaczny spadek w indeksie  $S$  z dodatkiem toryfikowanej biomasy. Spadek wskaźnika  $S$  jest konsekwencją zmniejszania się  $DTG_{max}$  przy większej zawartości *TMS* w mieszance.

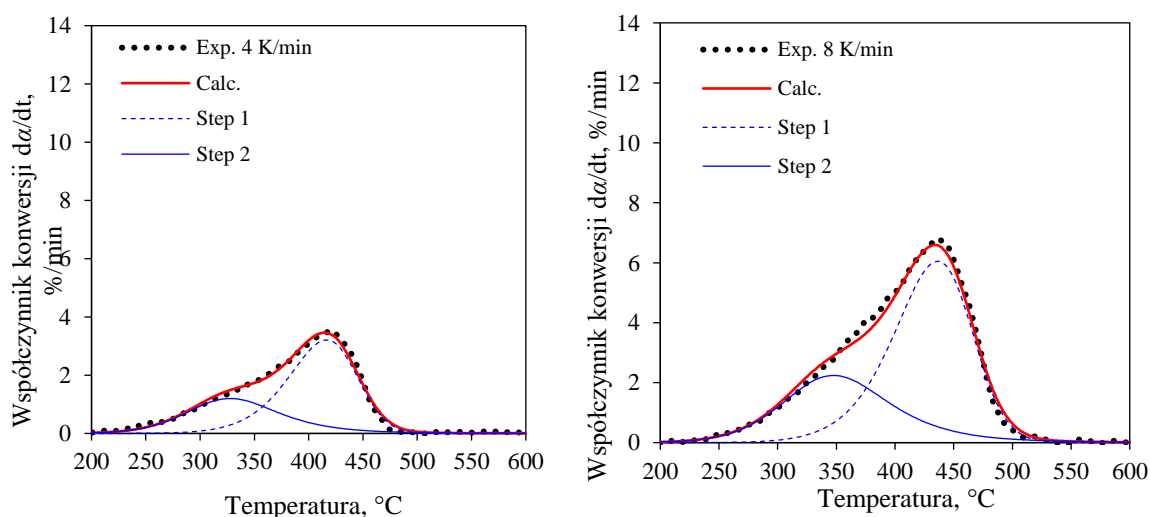
Teoretyczne (obliczone) krzywe *DTG* oszacowano na podstawie eksperymentalnych profili *DTG* węgla kamiennego *SBC* i biomasy *TMS* w celu sprawdzenia tego efektu. Porównując krzywe na Rysunku 9 można zauważyć trzy kluczowe obserwacje: a) teoretyczna i obliczona krzywa *DTG* różni się jedynie w obszarze  $DTG_{max}$ ; b) teoretyczne wartości  $DTG_{max}$  są podobne lub mniejsze od wyznaczonych eksperymentalnie; c) wraz ze wzrostem udziału dodatku *TMS* w mieszankach paliwowych, obliczona wartość  $DTG_{max}$  maleje. Zatem w obu przypadkach



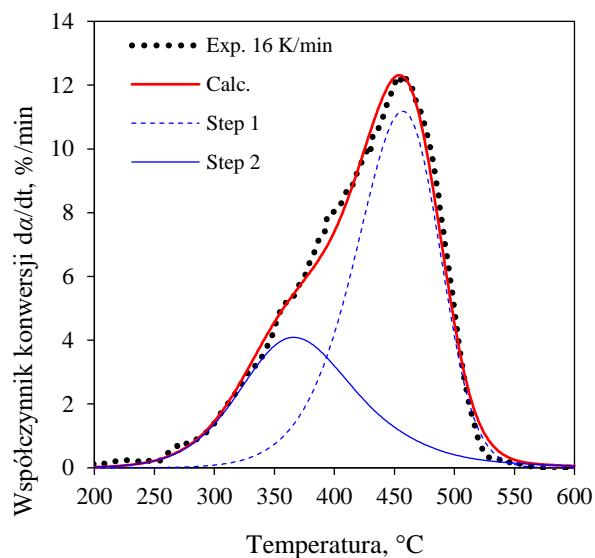
widoczny jest silny efekt synergistyczny pomiędzy składnikami mieszanki, różnica występuje jedynie w obszarze  $DTG_{max}$  i wynika z obniżenia reaktywności (tzw. efekt antysynergiczny), co zaobserwowali także inni naukowcy [A2]. Co ciekawsze, nawet podstawienie wyników teoretycznych do obliczenia indeksu  $S$  nie spowoduje wzrostu jego wartości, a wręcz przeciwnie, jego wartość może ulec zmniejszeniu. Analiza ta potwierdza, że obawa o zmniejszoną intensywność spalania obu mieszanek paliw jest słuszna i powinna być uwzględniona przy projektowaniu, modelowaniu i eksploatacji instalacji kotła pyłowego.



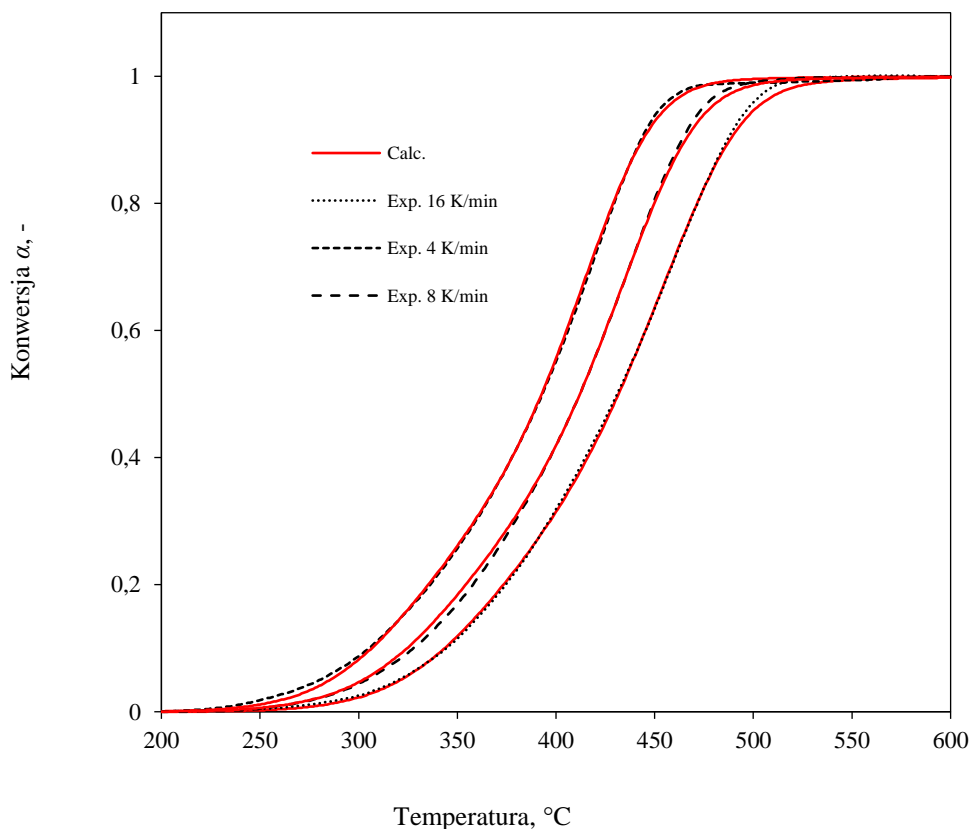
Rysunek 10. Analiza termograwimetryczna procesów spalania: węgla kamiennego (SBC), toryfikowanej słomy kukurydzianej (TMS) oraz mieszaniny węgla kamiennego i toryfikowanej słomy z kukurydzy SBC/TMS.



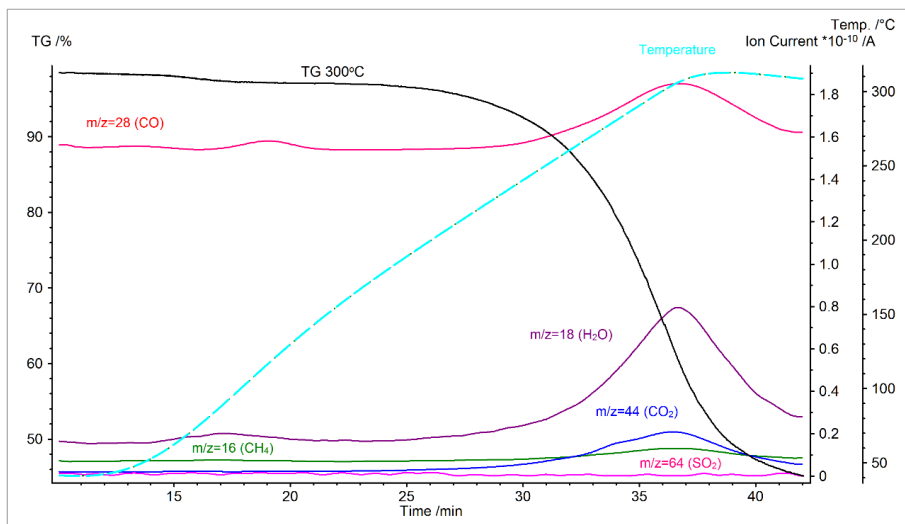
Rysunek 11. Analiza termograwimetryczna procesów spalania: węgla kamiennego (SBC), toryfikowanej słomy kukurydzianej (TMS) oraz mieszaniny węgla kamiennego i toryfikowanej słomy z kukurydzy SBC/TMS.



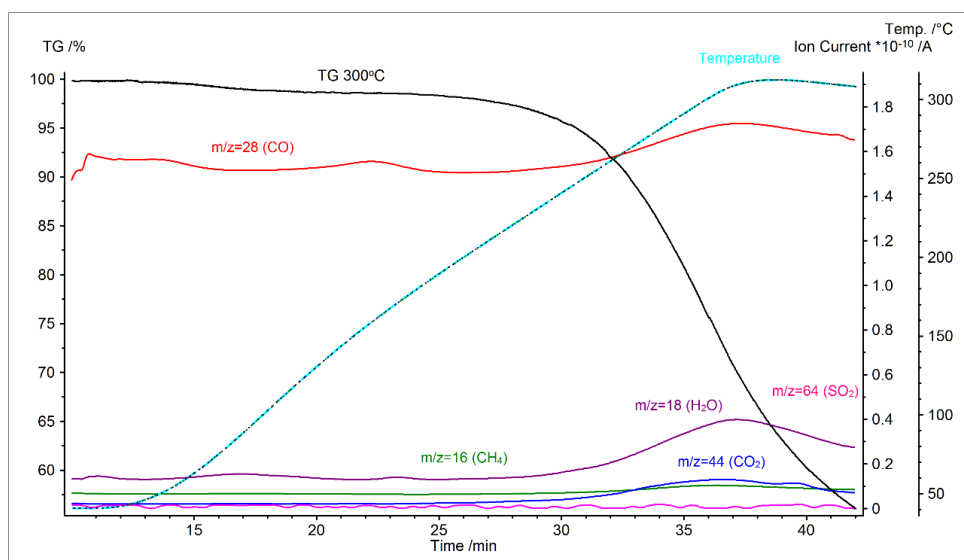
Rysunek 12. Analiza termograwimetryczna procesów spalania: węgla kamiennego (SBC), toryfikowanej słomy kukurydzianej (TMS) oraz mieszaniny węgla kamiennego i toryfikowanej słomy z kukurydzy SBC/TMS.



Rysunek 13. Analiza termograwimetryczna procesów spalania: węgla kamiennego (SBC), toryfikowanej słomy kukurydzianej (TMS) oraz mieszaniny węgla kamiennego i toryfikowanej słomy z kukurydzy SBC/TMS.



Rysunek 14. Wynikami analizy termograwimetrycznej procesu toryfikacji TG-MS dla słomy z owsa w temperaturze 300 °C [A8]

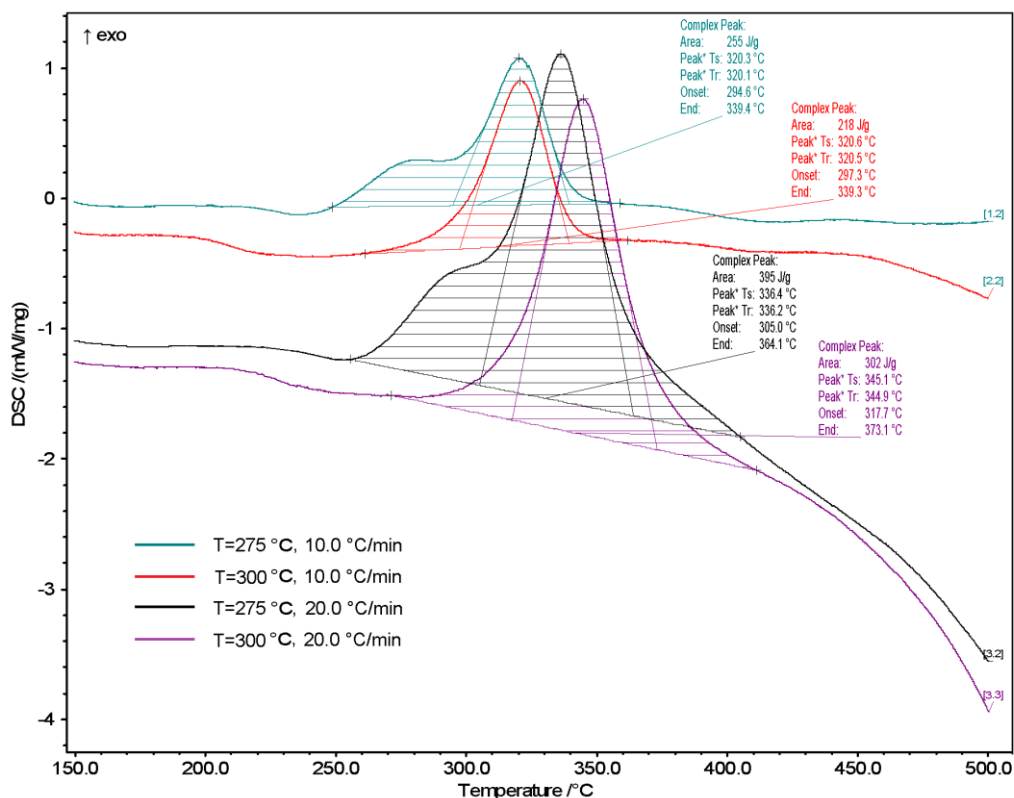


Rysunek 15. Wynikami analizy termograwimetrycznej procesu toryfikacji TG-MS dla Miskantusa w temperaturze 300 °C [A6]

Na Rysunku 16 przedstawiono krzywe DSC, na których obserwujemy temperatury rozpoczęcia procesu toryfikacji miskanta oraz ciepło wydzielone przy różnych stopniach ogrzewania. Temperatura zapłonu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości nagrzewania. Temperatura zapłonu wzrasta o prawie o 20°C przy zwiększaniu prędkości nagrzewania z 10 do 20°C/min. Ciepło wydzielone podczas spalania miskanta poddanego wcześniejszej toryfikacji (temperatura toryfikacji; 257°C) wzrosło o 995 W/g przy zwiększeniu prędkości nagrzewu z 10 do 20 K/min. Na tym samym rysunku możemy zobaczyć krzywe pirolizy DSC toryfikowanego miskanta przy różnych prędkościach ogrzewania 10 i 20 K/min w atmosferze N<sub>2</sub> w celu zbadania pirolizy miskanta poddanego procesowi toryfikacji w różnych temperaturach. Rozkład pierwszego składnika (hemicelulozy) toryfikowanego miskanta, po

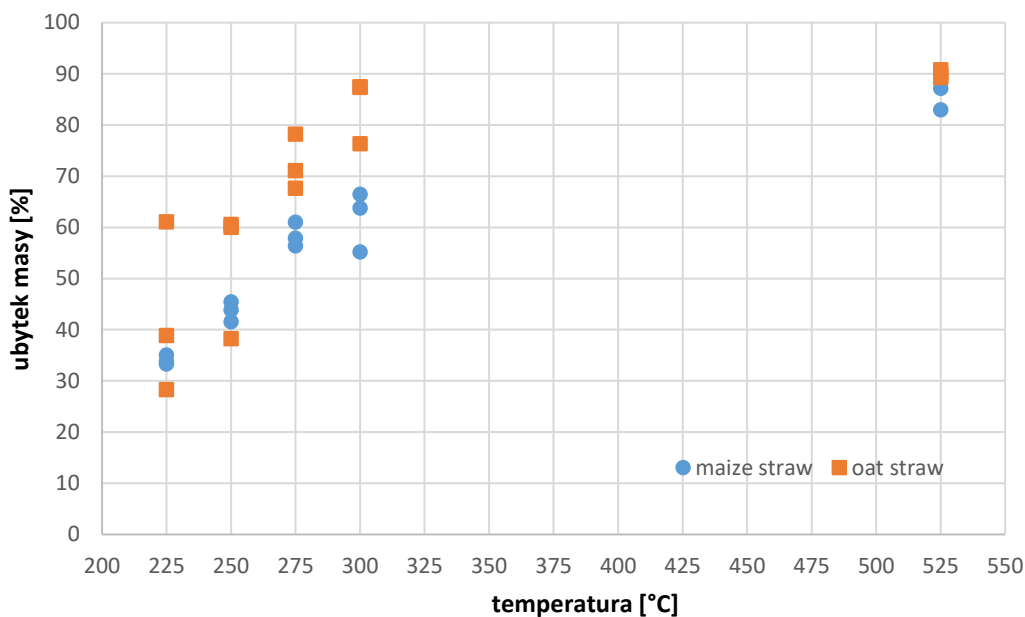


którym następuje szeroki egzotermiczny pik pirolizy mieszaniny trzech głównych składników, który przesuwają się do wyższej temperatury wraz ze wzrostem prędkości ogrzewania od 10 do 20 K/min. Piki rozkładu pirolitycznego miska poddane procesowi torfikacji pojawiły się przy 320,3; 320,6; 336,4 i 345,1°C przy prędkości ogrzewania odpowiednio 10 i 20 K/min (temperatura torfikacji; 257°C).



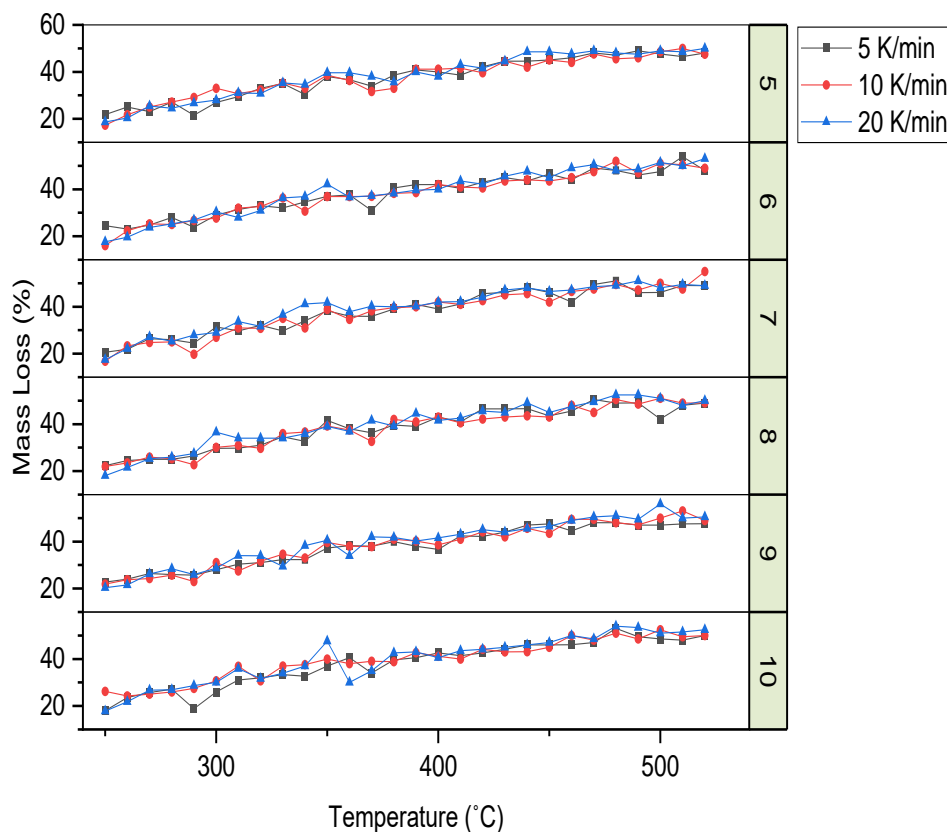
Rysunek 16. Analiza DSC torfikowanego miska w temperaturze 257°C i 300°C (prędkości nagrzewu: 10, 20 K/min) w atmosferze azotu.

Ubytek masowy podczas torfikacji słomy owsa i słomy z kukurydzy po procesie torfikacji w temperaturze do 300°C wykazał zmniejszenie masy podobne jak słomy niepoddanej obróbce przed procesem torfikacji – Rysunek 17. Wykazano, że stopień uwęglenia słomy z owsa i kukurydzy do temperatury 300°C był nieistotny w porównaniu z wartościami powyżej 300°C. Istnieją dwie główne przyczyny zmniejszenia masy suszonych lub torfikowanych produktów. Pierwsza to utrata wilgoci na początku procesu do temperatury 110°C, druga to rozkład termiczny z utworzeniem lotnych produktów gazowych, takich jak H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, kwas octowy i inne substancje organiczne. Zmniejszenie tempa ubytku masy jest skorelowane z dobrze znanymi efektami termicznymi, które objawiają się utratą wilgoci, po której następuje depolimeryzacja wtórnych składników ściany komórkowej: hemicelulozy, celulozy i ligniny. Wyjaśnia się, że spadek masy podczas torfikacji w niższej temperaturze jest spowodowany głównie utratą zawartości wody. Wartość opałowa obydwóch biomas stale wzrasta wraz ze wzrostem zawartości substancji lotnych i spadkiem zawartości popiołu.



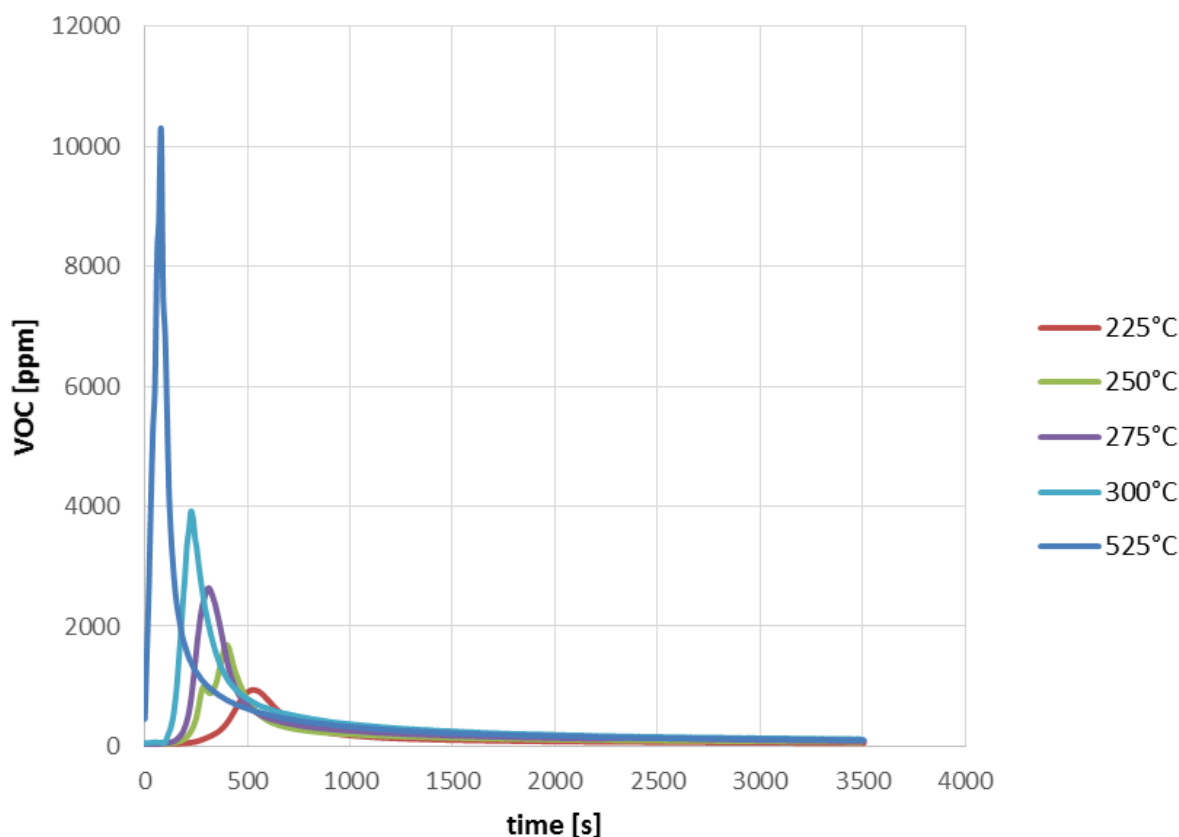
Rysunek 17. Ubytek masy słomy kukurydzianej i owsa po procesie toryfikacji i karbonizacji w atmosferze CO<sub>2</sub> z wykorzystaniem pieca elektrycznego [A7]

Na Rysunku 18 przedstawiono ubytek masy osadów ściekowych podczas analizy termogravimetrycznej co 10°C w skali 250-520°C. Podczas badań nad procesem toryfikacji osadów ściekowych zauważono, iż przy maksymalnej temperaturze 520°C ubytek masy mieścił się w zakresie 47-50% przy prędkości nagrzewu 5 K/min. Można zobaczyć, że minimalny i maksymalny ubytek masy wynosił 16 i 55% w odniesieniu do niższych i wyższych temperatur przy prędkości nagrzewania 10 K/min. Stwierdzono, że średni ubytek masy podczas nagrzewania z szybkością 10 K/min był większy niż 5 K/min. Zaobserwowano minimalne i maksymalne straty masy wynoszące 17 i 56% przy prędkości nagrzewu 20 K/min. W przypadku osadów ściekowych najmniejszy ubytek masy uzyskano podczas procesu przy prędkości ogrzewania 10 K/min, czasie przebywania 5 minut i temperaturze 280°C [A5].



Rysunek 18. Ubytki masy osadów ściekowych w zakresie temperaturach: 250-500 °C, czasie przebywania warunkach izotermicznych 5-10 min przy 3 prędkościach nagrzewania [A5].

Proces toryfikacji biomasy przebiega z uwolnieniem lotnych związków organicznych. Emisja ta w początkowym okresie jest bardzo szybka, choć z czasem maleje. Emisja lotnych związków organicznych LZO powstaje w wyniku beztlenowego rozkładu materii organicznej tworzącej biomasę i jest większa wraz ze wzrostem temperatury procesu toryfikacji. Maksymalne stężenia LZO w torzynie wzrastają do 10 000 ppm - Rysunek 19, natomiast współczynnik emisji (w przeliczeniu na jednostkę masy) osiąga wartość kilku mg/g toryfikowanej biomasy. Wysokie stężenia LZO w torzynie dają szansę na wykorzystanie ich jako źródła ciepła (paliwa) dostarczanego do procesu toryfikacji.



Rysunek 19. Emisja LZO w ppm słomy kukurydzianej podczas procesu toryfikacji w piecu elektrycznym w atmosferze CO<sub>2</sub> [A9].

### Uzyskane rezultaty

- Proces pirolizy niskotemperaturowej podłoża kolejowych podległego wcześniejszej toryfikacji charakteryzuje się wyższym ciepłem spalania w porównaniu do podłoża, którego nie było toryfikowane. Dzieje się tak na skutek zwiększonej koncentracji węgla pierwiastkowego w biomase. Przeprowadzenie obróbki termicznej w temperaturze 40°C pozwala na zatrzymanie w karbonizacji około 75% energii chemicznej biomasy, przy jednoczesnej zmianie ciężaru podkładów o niecałe 50%. [A1].
- Toryfikat ze słomy z kukurydzy ulega łatwiejszemu zapłonowi, pali się intensywniej i ma lepszą stabilność spalania w porównaniu z węglem kamiennym, przesuując obciążenie cieplne ścian paleniska w poprzek osi komory spalania [A2].
- Toryfikowana biomasa uzyskała parametry, które są zbliżone do parametrów węgla kamiennego i z powodzeniem może być tanim substytutem w Miejskich Przedsiębiorstwach Energetyki Ciepłej w kraju, tam gdzie dostępny jest substrat w postaci biomasy drzewnej i/lub biomasy pochodzenia rolniczego [A1, A2, A5, A6, A7, A8].
- Dodatek toryfikatu słomy z kukurydzy do węgla w postaci jednej mieszanki poprawia parametry zapłonu, nie zakłócając stabilności spalania, przy jednoczesnym zmniejszeniu intensywności spalania, przy właściwościach spalania mieszanki zbliżonych do węgla. [A2].

- Na poziomie przegrzewaczy temperatura pieca wzrasta wraz ze wzrostem udziału współspalania biomasy w rejonie wylotu komory pieca. Współspalanie przy podwyższonym udziale TMS zwiększa lokalne temperatury w okolicy miejsca podawania biomasy, a także gęstość strumienia ciepła przy ściankach pieca oraz lokalną emisję CO [A2].
- Zmienność wartości energii aktywacji w zależności od stopnia konwersji prawdopodobnie wskazuje, że proces toryfikacji drewna sosnowego nie zachodzą oddzielnie od siebie, lecz składają się z kilku nakładających się i równoległych procesów termochemicznych [A5]
- Przedstawione badania pokazują perspektywy zwiększenia efektywności energetycznej upraw topinamburu poprzez ekologiczne wykorzystanie odpadów z biofermentacji ziarna kukurydzy do metanu, stosowanych samodzielnie lub w połączeniu z polepszaczem gleby nowej generacji Apol-humus oraz nanoorganicznym środkiem Stymjod. -nawóz mineralny, jako alternatywa dla nawozów sztucznych, które zanieczyszczają środowisko [A7].
- Analiza kinetyki procesu toryfikacji biomas pochodzenia rolniczego wykazała, że najlepsze dopasowanie danych eksperymentalnych dla próbki słomy owsianej stwierdzono dla n-rzędowego modelu reakcji A3 dla  $n = 3,4235$ . Współczynnik korelacji  $R^2$  wyniósł 0,9972, współczynnik prepotencjalny 10,8466, a energia aktywacji 142 kJ/mol. Najlepsze dopasowanie danych eksperymentalnych dla próbki słomy kukurydzianej uzyskano dla n-rzędowego modelu reakcji dla  $n = 2,8859$ . Współczynnik korelacji  $R^2$  wyniósł 0,9966, współczynnik prepotencjalny 8,1309, a energia aktywacji 112 kJ/mol [A8].
- Użycie przegrzanej pary jako czynnika w procesie toryfikacji rozwiąże istniejący problem osadzania i utleniania żywicy w komorze reaktora do toryfikacji biomasy, która się wydziela w trakcie skraplania tzw. „torgazu” wydzielającego się w formie części lotnych w trakcie procesu toryfikacji [A19].

## Wnioski

Podsumowując wskazane powyżej rezultaty można stwierdzić, że proponowane metody przetwarzania biomas poprzez ich toryfikowanie powoduje znaczne polepszenie właściwości fizyko-chemicznych z przeznaczeniem na paliwa dla energetyki zawodowej. Analiza termogravimetryczna procesu toryfikacji biomas pozwoliła na zaprojektowanie i wykonanie instalacji do przeprowadzenia procesu toryfikacji w parze wraz z aparaturą, której działanie zostało przetestowane w trybie ciągłym. Istnieje nadal szereg problemów technicznych związanych z efektywnym przeprowadzaniem procesu toryfikacji biomasy w sposób niezawodny i bezpieczny (zagrożenie wybuchem i samozapłon toryfikatu po zakończonym procesie toryfikacji w fazie jego chłodzenia). Proces wstępnego suszenia biomasy z wykorzystaniem gorącego powietrza (odzyskanego z procesu kondensacji pary z procesu toryfikacji) w sposób znaczący wpływa na ekonomikę całego procesu toryfikacji z wykorzystaniem pary przegrzanej stosując reaktor przeciwprądowy w skali pilotażowej (50 kg/h substratu nieprzetworzonego) – projekt BIOCARBON Lider IX.

Słoma z kukurydzy toryfikowana w parze przegrzanej staje się produktem podobnym do węgla kamiennego pod względem właściwości fizykochemicznych [A2]. Wraz ze wzrostem

udziału toryfikowanej biomasy w mieszance paliwowej zwiększa się udział niespalonego paliwa w popiele lotnym. Zwiększenie udziału toryfikowanej biomasy z 30% do 40% w mieszance paliwowej powoduje nieznaczny wzrost stężenia molowego NO w komorze paleniska. Zaleca się zdecydowanie kontynuację prac nad dalszymi badaniami możliwości współspalania węgla z toryfikowaną biomasą w mieszankach wstępnie zmieszanych wtryskiwanych przez wszystkie palniki.

### III cel szczegółowy

Obecne metody toryfikacji nie pozwalają na odzyskanie cennych produktów ubocznych procesu toryfikacji. Zastosowanie pary przegrzanej do toryfikacji umożliwi odzyskiwanie tych produktów, a nie ich spalanie, co zwiększa wartość ekonomiczną procesu i wpływa na jego jakość wydajność środowiskowa. Powyższe rozwiązania nie są stosowane na rynku światowym. Nowy proces będzie innowacyjny, ponieważ zapewni dobrą kontrolę nad reakcją temperatury, a także homogeniczne produkty o różnych właściwościach użytkowych. Innowacyjność proponowanego podejścia, które nie ma odpowiednika w aktualnej metodzie toryfikacji biomasy, jest to, że zdecydowanie wycofuje się z użycia „torgazu” lub gazu obojętnego, takiego jak azot, w procesie toryfikacji. Zastosowanie pary przegrzanej jest ważne w kontekście optymalnej kontroli temperatury procesu jako jak również odzyskiwanie szeregu produktów ubocznych i bezpieczeństwo procesu (ograniczony potencjał pożaru lub wybuchu). Nowy proces toryfikacji parą przegrzaną będzie ekonomicznie wykonalny, zwłaszcza w kontekście stosowania niskotemperaturowego ciepła odpadowego do wstępnego suszenia biomasy i wykorzystania pary zamiast innych gazów. Na rynku nie ma generatorów pary małej wydajności (poniżej 1 MW). Para przegrzana jest wytwarzana w dużej energetyce zawodowej. Budowa instalacji do toryfikacji biomasy ma sens tylko wtedy, gdy jest to ekonomicznie uzasadnione.

Toryfikacja jako proces obróbki w wyniku dostarczanego ciepła przeprowadzany jest w wąskim zakresie temperatur (200-300 °C) i powoduje wzrost gęstości energetycznej biomasy głównie w wyniku dekompozycji reaktywnego składnika biomasy, którym jest hemiceluloza. Proces toryfikacji opisujemy dwoma głównymi etapami:

1) Etap pierwszy to reakcja w wyniku, którego powstaje ubytek masy na poziomie 25÷30 % pierwotnej masy toryfikowanej biomasy, który rośnie gdy rośnie temperatura do momentu uzyskania maksimum, przy którym ubytek masy w czasie jest największy (jest to drugi etap procesu toryfikacji). Początkowy etap ubytku masy jest szybszym, lecz mniej intensywnym etapem, którego przebieg tłumaczy się zmianą w kompozycji polimerów hemicelulozy.

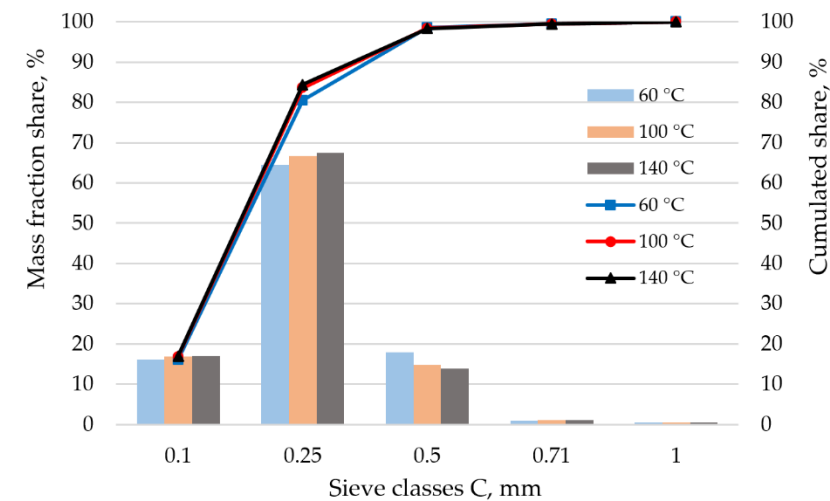
2) Drugi etap znacznie wolniejszy od pierwszego etapu, w którym to degradacja oraz wielkość ubytku masy w czasie jest dużo wyższa i związana jest z dekompozycją celulozy oraz uwęglaniem struktur hemicelulozy. Proces termicznego rozpadu biomasy drzewnej jest procesem kompleksowym ze względu na występowanie różnych frakcji drewna. W mikroskopowej skali drewno zbudowane jest z komórek w postaci mikrowiązek cząsteczek celulozy otoczonych cząsteczkami hemicelulozy. Lignina jest tą frakcją biomasy, który

znajduje się pomiędzy hemicelulozą i celulozą. Hemiceluloza, lignina i celuloza jako różne frakcje drzewne charakteryzują się różną wrażliwością cieplną. Poprzez różnych stopień reakcji na ciepło oraz wzrost temperatury można wyodrębnić trzy podstawowe strefy na krzywej ubytku masy: hemiceluloza, która jest składnikiem najbardziej reaktywnym i charakteryzuje się najwyższym stopniem degradacji w obszarze temperatur: 225÷325°C, celuloza, druga obok hemicelulozy frakcja w budowie biomasy ulega procesowi rozkładu w wyniku procesu toryfikacji w zakresie temperatur 300÷325°C i lignina, której zakres temperaturowy ubytku masy jest największy i wynosi od 250 do 500°C. Tłumaczy to dlaczego w procesie toryfikacji biomasy, którego zakres temperaturowy wynosi od 200 do 300 °C, największy ubytek masy czasie jest zauważalny przy dekompozycji dwóch składników biomasy drzewnej - w ligninie i hemicelulozie a najmniejszy przy degradacji celulozy. Stosunek udziałów hemicelulozy, ligniny oraz celulozy w biomacie ma bardzo duży wpływ na jakość lotnych produktów toryfikacji.

W ramach przeprowadzonych badań zawartych w pracach [A1, A5, A6, A7, A8, A9, A10] oprócz badań nad kinetyką procesu toryfikacji badano także właściwości fizyko-chemiczne takich biomas jak podkłady kolejowe, sosnę, Miskantusa, słomę z kukurydzy, słomę z owsa, osad ściekowy. Wśród najważniejszych analiz wykonanych nad tymi biomasami była analiza elementarna, analiza techniczna, analiza SEM-EDX oraz analiza lotnych związków organicznych powstających w trakcie procesu toryfikacji.

W celu zaklasyfikowania danego toryfikatu do konkretnego przeznaczenia skupiono się na analizowaniu stosunku pierwiastków H/C i O/C, wartości opałowej, zawartości popiołów oraz ubytkowi masy. Niższy stosunek tlenu do węgla powodują, iż gazyfikacja toryfikatu jest bardziej wydajna w stosunku do gazyfikacją biomasy nieprzetworzonej (jest to obecnie przedmiotem badań w projekcie dofinansowanym z Horyzontu Europa CARBIOw, w którym to badany jest w skali pilotażowej proces zgazowywania odpadów komunalnych poddanych wcześniejszemu procesowi toryfikacji).

Wyniki badań innych naukowców jak i przeprowadzone badania nad procesem toryfikacji wykazały, iż przy ubytkach masy na poziomie 30% (części lotne jakie są wydzielane w procesie toryfikacji zawierają około 10 % energii pierwotnie zawartej w biomacie) zazwyczaj dana biomasa uzyskuje taki wzrost pierwiastka C i wartości opałowej a jej struktury polimerowe: lignina, celuloza i hemiceluloza (dochodzi do trwałego rozpadu grup -OH) ulegają takiej degradacji, iż dana biomasa zaczyna mieć właściwości hydrofobowe (). Niska zawartość wilgoci w toryfikacie (1-6 %) sprawia, że różnica pomiędzy wartością opałową a ciepłem spalania jest niewielka.

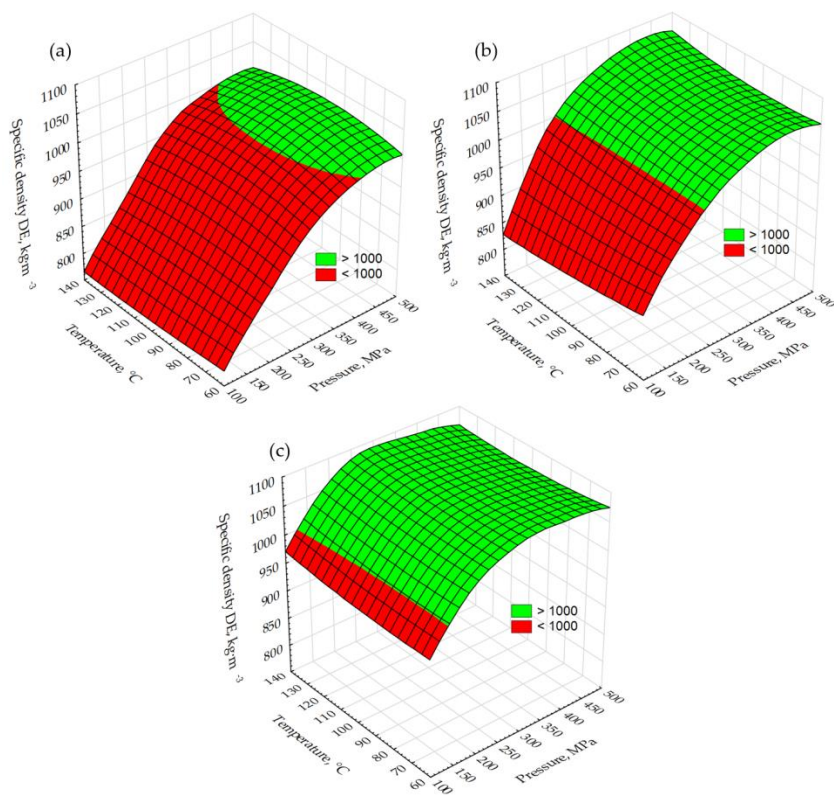


Rysunek 20. Analiza rozkładu wielkości cząstek próbek.

W pracy [A6] przeprowadzono analizę procesu suszenia przeprowadzono przy trzech poziomach temperatur medium suszącego (60, 100 i 140°C). Zagęszczanie na prasie hydraulicznej prowadzono w zakresie ciśnień charakterystycznych dla aglomeracji ciśnieniowej (130,8–457,8 MPa) przy różnej wilgotności surowca (0,5% i 10%). Głównym przedmiotem zainteresowania w tej części była ocena wpływu temperatury suszenia, zawartości wilgoci i ciśnienia zagęszczania na gęstość właściwą (DE) i trwałość mechaniczną peletów miskanta (DU) – Rysunek 21.

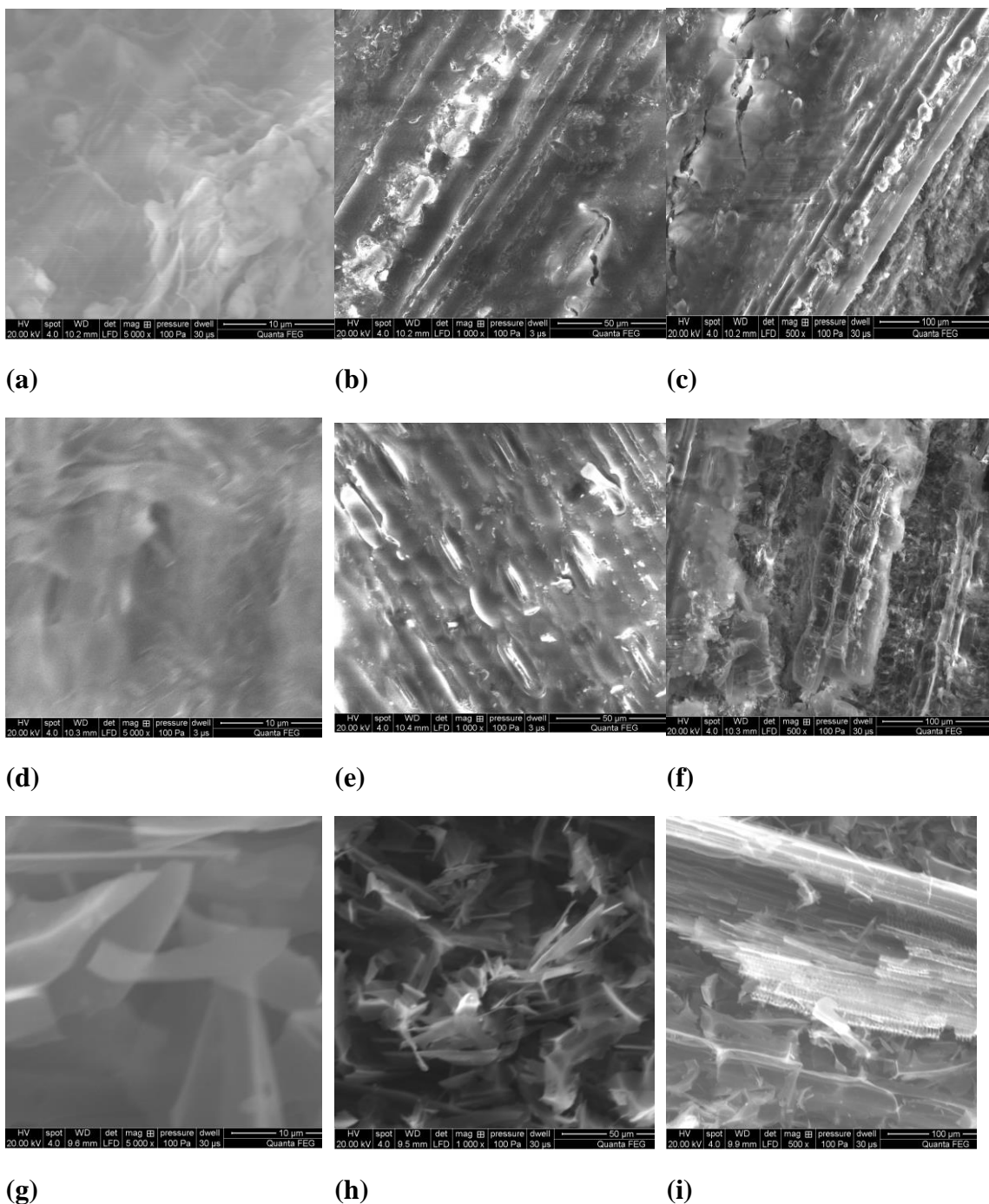
Pelet utworzony z toryfikatu odznacza się wysoką gęstością energetyczną, jest odporny na chłonięcie wilgoci oraz nie wymagają specjalnej infrastruktury do składowania i magazynowania tak jak w przypadku zwykłego peletu. Toryfikat, który został poddany procesowi toryfikacji, oraz który posiada silną naturę hydrofobową wynikającą z degradacji grup OH w porównaniu do peletu toryfikatu nie jest tak trwały i łatwy do magazynowania i transportu co w konsekwencji ogranicza jego zastosowanie w pyłowych kotłach węglowych bądź w kotle ze złożem fluidalnym. Pelet z toryfiaktu może być za to wykorzystywany w procesie spalania oraz współspalania w wyżej wymienionych kotłach dzięki takim pozytywnym zjawiskom jak skrócony czas zapłonu części lotnych oraz koksu [A2]. Jednak nawet tak wysoce zaawansowane technologie przygotowania biomasy do współspalania z węglem nie likwidują kłopotów związanych tworzeniem się osadów na ściankach wymienników i ekranów kotła oraz korozją.





Rysunek 21. Zmiany gęstości właściwej badanego peletu DE z Miskanta w zależności od temperatury suszenia i ciśnienia zagęszczania: (a) próbka sucha, (b) wilgotność na poziomie 5% i (c) wilgotność na poziomie 10%. [A6]

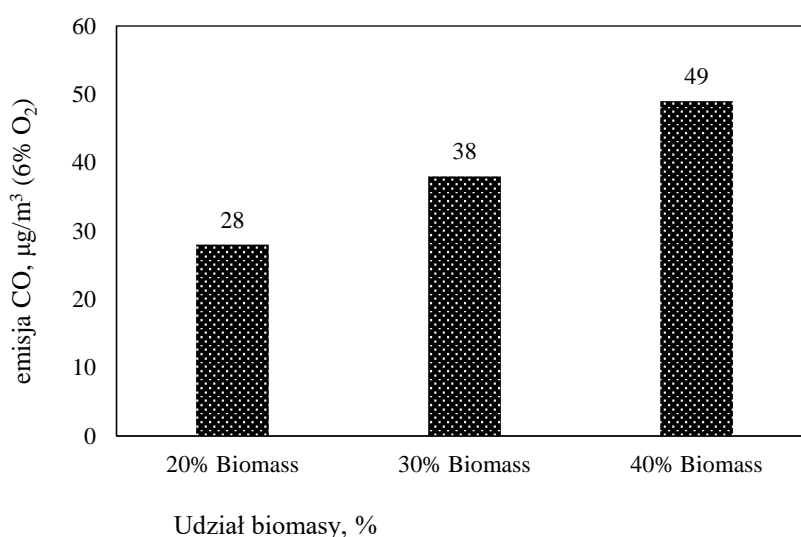
Połączenie peletyzacji biomasy z procesem torfikacji daje najlepszy produkt odznaczający się dobrymi właściwościami paliwowymi i pozwala rokować dobrze na przyszłość dla biomasy, która mogła by jako alternatywne źródło energii stać się w najbliższej rzeczywistości częściowym bądź całkowitym substytutem paliwowym dla węgla. Największymi osiągnięciami naukowymi w dziedzinie peletyzacji torfikatu może się poszczycić holenderki Instytut Naukowy ECN – Energy Research Center of Netherlands, w którym to centrum opatentowano metodę peletyzacji torfikatu pod nazwą technologii ECN. Polega ona na zastosowaniu reaktora typu bezpośredniego, w którym to pod wpływem gorących gazów powstałych w wyniku torfikacji (torgaz) surowiec zostaje dodatkowo przetworzony. Po zakończeniu badań w pierwszy Zadaniu 1 w koordynowanym przeze mnie projekcie BioTrainValue planuje się wytworzenie peletów z torfikatów wytworzonych w parze przegrzanej (instalacja wytworzona w ramach projektu BIOCARBON – Lider IX) ze słomy z kukurydzy u partnera projektu BEST GmbH w Austrii (Graz) i przetestowanie jego właściwości mechanicznych (podobnie jak w przypadku peletów z miskanta [A6]) oraz wykonanie testów spalania peletów z torfikatów w kotle mocy 500 kW.



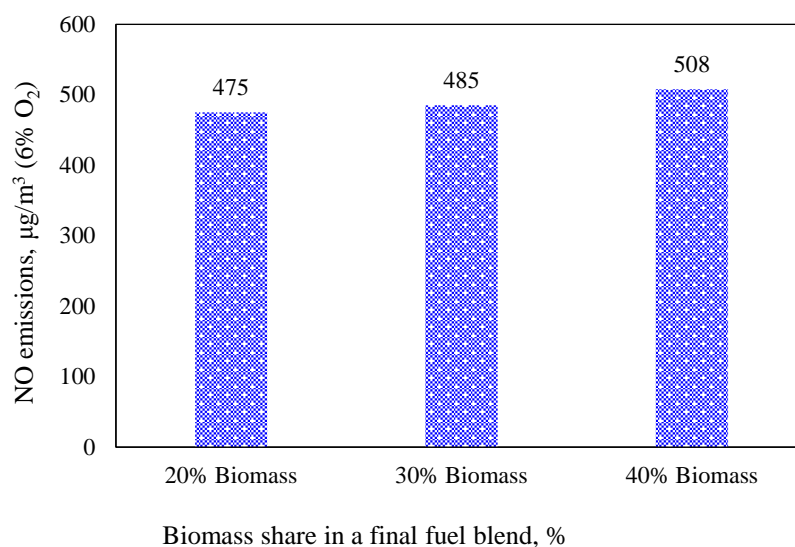
Rysunek 22. Obrazy mikroskopowej analizy SEM toryfikowanego miskanta: powiększenie 257°C (a) 5000×, (b) 1000× i (c) powiększenie 500× i 300°C (d) 5000×, (e) 1000×, ( f) 500×, 525°C (g) 5 000×, (h) 1 000× oraz (i) 500× [A6].

Współspalanie biomasy w połączeniu z węglem w konwencjonalnych kotłach energetycznych jest kierunkiem rozwoju obecnej energetyki zawodowej w Polsce i w wielu innych krajach Europy i świata. Dokonując analizy zasobów energii odnawialnej w Polsce uzyskujemy jeden istotny wniosek: biomasa posiada największy potencjał energetycznych, ponieważ to w niej zakumulowana jest większość energii możliwej do pozyskania ze źródeł odnawialnych. Niestety stosowanie biomasy nieprzetworzonej (o dużej zawartości wilgoci i substancji organicznych oraz mineralnych chloru, sodu, potasu) powoduje szereg problemów technicznych i eksploatacyjnych w kotłach opalanych węglem.

Biomasę jako paliwo w energetyce można spalać w różnoraki sposób, najczęstszymi sposobami jest jej bezpośrednio spalanie w specjalnych kotłach ze złożem fluidalnym, które charakteryzują się bardzo dużą sprawnością podczas procesu spalania i stabilnymi warunkami pracy. Drugim najczęściej wykorzystywanym sposobem spalania biomasy jest jej współspalanie wraz z węglem w kotłach energetycznych pierwotnie zaprojektowanych do spalania węgla kamiennego bądź brunatnego. Dużo większym zainteresowaniem naszej krajowej energetyki i ciepłownictwa cieszy się drugi sposób spalania biomasy wraz z węglem w istniejących już blokach ciepłych. Rozwiązanie to wydaje się najkrótszą drogą, która zapewnia, że biomasa spalana w dużych kotłach energetycznych będzie wykorzystana jak najlepiej i stopień konwersji energii chemicznej w niej zawartej na energię elektryczną i ciepłą będzie najwyższy. Wszystkie najnowsze prace badawcze doświadczenia eksploatacyjne, zwłaszcza te w obszarze współspalania biomasy z węglem zmierzają do optymalizacji tego procesu i do ograniczenia emisji zanieczyszczeń powstających w jego wyniku. Najważniejsze wady stosowania współspalania biomasy: - kompleksowy proces wstępnego przygotowania biomasy (suszenie, rozdrabnianie) do jej współspalania, związane również z przygotowaniem odpowiedniej infrastruktury magazynowej; - duża konkurencja wśród konsumentów biomasowych oraz cena biomasy; - obniżenie sprawności i wydajności kotła; - szereg efektów ubocznych takich jak szlakowanie powierzchni ogrzewalnych związanych ze składem substancji mineralnej biomasy.



Rysunek.24. Wyniki badań nad współspalaniem torfikatów z węglem kamiennym (model numeryczny kotła OP-230), emisja CO w kanale spalin [A2]



Rysunek 25. Wyniki badań nad współspalaniem torfikatów z węglem kamiennym (model numeryczny kotła OP-230), emisja NO za kotłem [A2]

### Zastosowanie torfikatu z biomasy jako dodatków do nawozów organicznych

W wyniku dokonanej analizy ubytku masy w trakcie procesu torfikacji biomasy [A5, A6, A7, A8] oraz jak wynika z przeglądu wyników dostępnych na świecie najczęściej otrzymywanym ubytkiem masy dla torfikatów z przeznaczeniem jako nośnik pierwiasta C dla nawozów jest zakres ubytku masy od 40-60%.

Wnioski z badań w zakresie wykorzystywania biowęglu jako dodatku do nawozu (dane otrzymane od partnerskiego Instytut Sadownictwa w Skierniewicach). Zastosowanie biowęglu z mikroorganizmami wpływa na zwiększenie plonu i liczby owoców, w porównaniu do plonowania drzew kontrolnych. Zaaplikowanie biowęglu z mikroorganizmami wpłynęła na istotne zwiększenie świeżej i suchej masy korzeni drzew (dzięki znacznemu zwiększeniu ilości mikro, mezo i makro por w wyniku zastosowania procesu torfikacji). Korzenie drzew traktowane biowęglem były dłuższe i bardziej zagęszczone niż korzenie roślin kontrolnych. Korzenie drzew nawożone biowęglem, posiadały komórki kory wypełnione skrobią. Największy plon i średnią masę owoców uzyskiwano z drzew traktowanych biowęglem w dawce 0,8 kg/drzewo. Zastosowanie biowęglu wpłynęło na znaczny wzrost korzeni drobnych, co wskazuje na korzystne oddziaływanie biowęglu na formowanie korzeni. Biowęgiel istotnie zwiększał wilgotność gleby na której rosły drzewa Aplikacja biowęglu w 2014 roku wpłynęła na zwiększenie zasiedlania korzeni przez grzyby mikoryzowe oraz wzrostu wegetatywnego i plonowania drzew W 2014 roku w Instytucie Sadownictwa w Skierniewicach założono doświadczenie „wpływ biowęglu na wzrost i plonowanie brzoskwini, jabłoni i nektaryny” Zawartość pierwiastka węgla w glebie w 3 roku wzrosła z 20% do 60%. Wzrasta plenność upraw wielkotowarowych (kukurydzy) średnio o 25%. Wzrasta jakość uprawy (kukurydza była wyższa, grubsze łodygi, większe kolby). Większa odporność gleby na okresy suche (większa wilgotność gleby). Zasypywanie gnojowicy biowęglem powoduje całkowitą absorpcję zapachów, a powstały produkt jest naturalnym wysoko zmineralizowanym dodatkiem gleby. Dodatek biowęglu w ilości 4% i 8% do obornika wpływa korzystnie na rozmnażanie się dżdżownic z gatunku Eiseniafetida podczas kompostowania. Najwyższa produkcja kokonów

została zaobserwowana po 4 tygodniach , wzrosła o 13%. Średnio całkowita biomasa dżdżownic po 8 tygodniach wzrosła o 20%.

## Uzyskane rezultaty

- Temperatura procesu suszenia takich roślin energetycznych jak Miskant zmienia właściwości materiału, zmiany te nie wpływają znacząco na proces zagęszczania w celu wytwarzania pelletów (nie ma wyraźnej zależności DE i DU od temperatury suszenia). Jest to wynik, który oznacza, że suszony w szerokim zakresie temperatur materiał może być wykorzystany do etapu zagęszczania bez ryzyka utraty parametrów jakościowych granulatu. Pozwala to na dobranie właściwej temperatury suszenia dla procesów przygotowania materiału, redukując w ten sposób nakłady energetyczne wymagane do tych procesów. Na przykład temperatura suszenia znacząco wpływa na proces mielenia [A5].
- Proces toryfikacji przeprowadzono w przypadku miskanta w celu ustalenia najlepszej temperatury toryfikacji dla różnych zastosowań przemysłowych, takich jak biopaliwo stałe, nośnik dla bionawozów i węgiel aktywny. Zaobserwowano widoczne wzrosty wartości opałowej do temperatury 400°C są one związane z usuwaniem tlenu i wodoru. Gdy temperatura karbonizacji Miskanta wzrosła powyżej 500°C, nastąpiło obniżenie wartości opałowej [A5].
- Za badań nad procesem toryfikacji sosny oraz osadu ściekowego można było zaobserwować, że wpływ czasu przebywania podczas procesu toryfikacji w zadanych warunkach izotermicznych (w zadanej docelowo temperaturze toryfikacji) na zawartość substancji lotnych i popiołu nie był tak duży jak sama wartość docelowej temperaturze procesu toryfikacji biomasy. Masa badanych biomas zmniejsza się wraz ze wzrostem czasu przebywania w procesie toryfikacji. Powyższe obserwacje można wytłumaczyć efektem zmniejszenia zawartości wody i substancji lotnych w biomasie drzewnej i osadach ściekowych. Dodatkowo na początku procesu toryfikacji osadów ściekowych nastąpił znaczny ubytek masy, natomiast przy dłuższym czasie przebywania osadów ściekowych zmiana wydajności masy nie była aż tak istotna. Wyniki można wytłumaczyć faktem, że na początku procesu toryfikacji sosny i osadów ściekowych następuje rozkład bardziej reaktywnych składników [A6].
- Procent wagowy pierwiastka C w finalnych produktach procesu toryfikacji biomasy pochodzenia rolniczego wzrasta wraz ze wzrostem temperatury procesu toryfikacji słom (kukurydza i owies), w przeciwieństwie do procentów wagowych CaH i O, wykazywał tendencję spadkową. Można to wytłumaczyć faktem, że w procesie toryfikacji biomasy następuje odwodnienie i karbonizacja. Oczywiście jest, że emisja CO<sub>2</sub>, CO czy H<sub>2</sub>O będzie skutkować zmniejszeniem zawartości H i O w słomie owsa i kukurydzy [A8].
- Produkty w postaci toryfikatów słomy z kukurydzy, słomy z owsa i miskanta będą mogły też służyć ich producentom – rolnikom jak biowęgiel w postaci dodatku do nawozów - nawóz organiczny, odpowiedni dla rolnictwa i szklarni, poprawiający właściwości gleby i zwiększający wydajność. Sторыfikowana biomasa ma również zdolność do określenia klasyfikacji gleby i remediacji gleby zanieczyszczonej np. kationami metali ciężkich [A9]
- W badaniach przeprowadzonych z wykorzystaniem reaktora wsadowego nad 3 biomasami (wierzba energetyczna, ślazier pensylwiański, słonecznik bulwiasty/topinambur) stwierdzono, iż najbardziej optymalne warunki procesu toryfikacji do wytwarzania

wysokokalorycznych paliw stałych to temperatury w zakresie 245–250 °C, oraz a czas przebywania w zakresie 12–14 min. Przekroczenie tych wartości prowadzi do zbyt wysokiej karbonizacji i powoduje zbyt dużą utratę części lotnych. Ponadto, przekroczenie zalecanej temperatury procesu toryfikacji jest niepotrzebną dyssypacją energii i paliwa, a koszty ekonomiczne z tym związane mogą spowodować, iż cały proces stał by się nieopłacalny [A10].

## **Wnioski końcowe**

Przeprowadzone badania nad procesem toryfikacji biomasy pochodzenia rolniczego, biomasy drzewnej, roślin energetycznych oraz osadów z oczyszczalni ścieków wykazały, iż bardzo istotnym elementem wpływającym na przeznaczenia danego biomasy poddanej waloryzacji są jej pierwotne właściwości fizyko-chemiczne. Skład elementarny (zawartość C, H, N, S, O) danej biomasy ma istotny wpływ na jej przeznaczenie docelowe. Jednakże, najważniejszym parametrem jak wykazały przeprowadzone badania jest temperatura procesu toryfikacji, która wpływa bezpośrednio na finalną ilość pierwiastków C, H, O. Drugim istotnym parametrem procesu toryfikacji jest czas przebywania w zadanej temperaturze procesu (determinuje on również obok temperatury o poziomie karbonizacji i ubytku masy pierwotnej). Badania własne oraz dostępne wyniki innych naukowców wykazały, iż najbardziej wskazanym poziomem ubytku masy pierwotnej biomas poddanych procesowi toryfikacji jest 30% dla toryfikatów przeznaczonych na cele energetyczne (substytut węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach: spalanie bezpośrednie jak i współspalanie). Badania przeprowadzone w parze przegrzanej nad procesem toryfikacji słomy z kukurydzy wykazały, iż toryfikat słomy z kukurydzy i węgiel kamienny wykazują pozytywne efekty synergii podczas ich współspalania [A2]. Badania nad procesem toryfikacji roślin energetycznych takich jak miskant [A6] z ich przeznaczeniem na biowęgiel jako nośnik pierwiastka węgla C do produkcji nawozów organicznych pozwoliły określić zakres parametrów procesu toryfikacji (temperatura i czas przebywania w reaktorze) w celu uzyskania 50% poziomu ubytku masy pierwotnej przy, której zakłada się iż jest to z ekonomicznego poziomu nadal wystarczająco duży ubytek masy (a także odpowiednio wysoka zawartość pierwiastka węgla C jak i porowatość materiału). W kolejnych badaniach planowanych do wykonania planuje się zastosowanie oprócz pary przegrzanej różnego rodzaju katalizatorów zeolitowych specjalnie modyfikowanych (H-Beta, H-ZSM-5, H-USY, H-Y), w których modernizacji specjalizuje się partner zagraniczny z Kemijski Institute z Ljubljany na Słowenii (partner projektu BioTrainValue). Dzięki zastosowaniu pary przegrzanej zamiast azotu lub dwutlenku węgla można odzyskiwać produkty uboczne z procesu toryfikacji, tj. drogi kwas propionowy, kwas mrówkowy czy też kwas octowy, natomiast poprzez dodanie katalizatorów, w tym katalizatorów zeolitowych można podwyższyć ilość otrzymywanego cennego kwasu lewulinowego wykorzystywanych w przemyśle chemicznych, farmaceutycznym i kosmetycznym. Dzięki temu zwiększy się wartość ekonomiczna procesu oraz będzie on bardziej przyjazny dla środowiska. Badania wykazały, iż proces toryfikacji biomas nie jest najlepszym procesem do przetwarzania biomas w celu otrzymywania z nich biosorbentów do oczyszczania spalin z metali ciężkich (prac wspólne z naukowcami z AGH w ramach projektu Lider X). Badania w zakresie wytwarzania biowęgla do produkcji nawozów będą kontynuowane we współpracy z kluczowymi ośrodkami w kraju (IUNG Puławy) i zagranicą (BEST GmbH, Austria) w celu rozwijania nowych nawozów, poprawy jakości gleb i uzyskania zdrowszych (wyższe zawartości pożądaných substancji mineralnych) produktów żywnościowych

### **4.3. Omówienie możliwości wykorzystania otrzymanych rezultatów**

Uzyskane w ramach przeprowadzonych prac efekty oraz sformułowane na ich podstawie wnioski dotyczące procesu toryfikacji są aktualnie weryfikowane pod kątem ich potencjalnego wykorzystania, w celu podniesienia poziomu gotowości technologicznej opracowanych rozwiązań.

Pozytywną weryfikację opracowanej technologii toryfikacji biomasy z wykorzystaniem pary przegrzanej potwierdził zakończony projekt BIOCARBON (Lider IX:0155/L-9/2017), w którym wybudowałem instalację do toryfikacji w skali pilotażowej (wytwornica pary 200 kW mocy cieplnej, suszarka bębnowa typu „rolling-bed”: 50 kg/h, reaktor przeciwprądowy do toryfikacji: 50 kg/h, scrubber – docelowa rozbudowa o kolumnę rektyfikacyjną i turbinę parową przeciwprężną). W zakresie skalowania opracowanej technologii toryfikacji w parze (projekt BIOCARBON – Lider IX) kolejnym etapem prac badawczo-rozwojowych będzie przeskalowanie istniejącej instalacji z wydajności 50 kg/godzinę do 500 kg/godzinę i skonstruowaniu nowego typu reaktora do przeprowadzania procesu toryfikacji w parze o jak najbardziej optymalnych warunkach dla wymiany ciepła parczącej biomasy oraz suszarki zasilanej parą a nie jak do tej pory gorącym powietrzem. Badania nad nowymi właściwościami toryfikatów powstałych w parze będą się skupiać nad ich porowatością, powierzchnią aktywną oraz wytrzymałością mechaniczną po ich pelletyzacji oraz nad parametrami procesu spalania w kotłach przemysłowych małej (25 kW-500 kW mocy cieplnej) i średniej (500 kW-5 MW).

Aktualnie prowadzona jest weryfikacja procesu toryfikacji biomas w następujących obszarach:

#### **a) Przemysł skórzany**

- prace realizowane z firmą Bader Sp. z o.o. w ramach projektu MIZDRA Badania Aplikacyjne NCBR (Ekspert ds. Skalowania Technologii – piroliza strużyn garbarskich). 1.07.2023-31.10.2023 Ekspert Skalowania Technologii: BADER Polska Sp. z o.o. “Opracowanie technologii racjonalnego zagospodarowania strużyn z przetwórstwa skór (MIZDRA 2.0)”, PROJEKTY APLIKACYJNE 7 1/4.1.4/2020, NCBR 2014-2020  
Zakres obowiązków: Rozwiązywanie bieżących problemów technologicznych związanych z stóżynami garbarskimi na etapie skalowania technologii pirolizy/toryfikacji ze skali laboratoryjnej do skali pilotażowej w siedzibie Spółki, minimalizacja ryzyk związanych z przeskalowaniem instalacji oraz podczas rozruchu, obliczenia i analizy procesowe i energetyczne, komunikacja pomiędzy podwykonawcy (dostawcy technologii) oraz Dyrektora Technicznego w zakresie suszenia, pirolizy, uwęglania, odzysku ciepła dla zakładu. Etap 5 Opracowanie technologii suszenia i pirolizy mizdry Etap 6 Pilotażowa, modułowa instalacja do pirolizy mi Wartość projektu: 10 377 225 PLN

#### **b) Energetyka: toryfikat jako paliwo (toryfikacja + piroliza, toryfikacja + zgazowanie)**

- 2.01.2023-31.12.2026 Koordynator Projektu (koordynator całego konsorcjum) HORIZON-MSCA-SE-2021 (Marie Skłodowska-Curie Staff Exchange), BioTrainValue: „BIOmass Valorisation via Superheated Steam Torrefaction, Pyrolysis, Gasification Amplified by Multidisciplinary Researchers TRAINing for Multiple Energy and

Products' Added VALUES": <https://cordis.europa.eu/project/id/101086411/pl> ;  
<http://biotrainvalue.eu/> , Projekt nr. 101086411 we współpracy z :

TUL - Polska-Politechnika Łódzka – Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska – (Koordynator BioTrainValue: dr inż. Szymon Szufa)

APS - Polska – APS-Ekoinnowacje Sp. z o.o. – (Lider Piotr Piersa) – Partner Przemysłowa

3) TUC: Politechnika Kretańska: - Wydział Inżynierii Środowiska, Kreta, Grecja (Lider Prof. Stelios Rozakis) – Partner Naukowy

4) WHZ Uniwersytet Techniczny Zwickau, Niemcy – Wydział Businessu i Ekonomii – (Lider: Prof. Dr. rer. pol. Dr. h.c. mult. H.- Christian Brauweiler – Partner Naukowy

5) NIC - Narodowy Instytut Chemii, Katedra Katalizy i Inżynierii Reakcji Chemicznej, Lubljana Słowenia (Lider: Prof. Dr. Blaž Likozar, Assist. Professor) – Partner Naukowy

6) BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH – Graz Austria (Lider: Dr Elisabeth Wopienka) – Partner Przemysłowy.

7) Müller Abfallprojekte GmbH – Weibern Austria (Lider: Stephan Hinterberger – Partner Przemysłowy

8) Wielka Brytania - ASTON University (Lider: Prof. Jude Onwudili) – Partner Naukowy

9) Wielka Brytania - PyroGenesis – Birmingham – (Lider: Dr Simon Ighofose) – Partner Naukowy

10) ARIGNA FUELS – Arigna, Irlandia, (Lider: Dr Robert Johnson) – Partner Naukowy. Zakres obowiązków: zarządzanie projektem, oddelegowywanie naukowców do partnerów przemysłowych, przyjmowanie partnerów przemysłowych w jednostce naukowej, organizacja konferencji, sympozjów naukowych i spotkań zespołu zarządzającego konsorcjum, przygotowywanie grantów badawczo-rozwojowych, publikowanie monografii i artykułów naukowych, promocja projektu. Wartość całego projektu: 1 251 200 EURO, w tym (184 000 EURO - POLSKA)

- 1.10.2022-31.10.2023 Ekspert ds. procesu toryfikacji odpadów komunalnych (0.1 fte), National Institute of Chemistry, Katedra Katalizy i Inżynierii Reaktorów Chemicznych, Ljubljana, Słowenia: HORYZONT EUROPA, CARBIOW “CARBIOW-Carbon Negative Biofuels from Organic Waste ”, <https://www.carbiow.eu/> , Nr. projektu 101084443, HORIZON-CL5-2021-D3-03 (Sustainable, secure and competitive energy supply) HORIZON-CL5-2021-D3-03-09. Obowiązki: produkcja biopaliw stałych i gazowych z ujemną emisją dwutlenku węgla z odpadów komunalnych, transformacja ekologiczna i wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym, frakcje organicznych odpadów stałych i komunalnych oraz pozostałości z biorafinerii oraz procesów biologicznych wykorzystywane w celu produkcji paliw dla lotnictwa. Rozwój technologii toryfikacji i zgazowania od poziomu gotowości technologicznej TRL 2 do 5 (pilotażowa instalacja łącząca toryfikację i zgazowanie odpadów komunalnych). Budżet całkowity: 4 850 125 €, w tym NIC: 340 000 € (Partner: NIC, Ljubljana, Słowenia)

***c) Rolnictwo: toryfikaty/biowęgiel jako nośnik pierwiastka węgla - dodatki do nawozów organicznych***

- 1.07.2022-31.12.2023 Główny wykonawca – LIDER XII, (Starszy technolog procesu toryfikacji– 0.25 etatu umowa o dzieło): Specjalista ds. Toryfikacji Biomasy: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy, Działania 1.2 „LIDER XII” NCBiR 2014-2020, (0184/L-12/2020). Temat: “Opracowanie innowacyjnej



technologii wytwarzania wzbogaconych mikrobiologicznie bionawozów wspomagających zrównoważoną produkcję roślinną i jej adaptację do zmian klimatu”

Zakres obowiązków: wytwarzanie i charakterystyka właściwości fizyko-chemicznych biowęgla z biomas w wyniku procesu toryfikacji parą przegrzaną na potrzeby produkcji wzbogaconych mikrobiologicznie bionawozów

Wartość projektu: 1 475 875,00 zł PLN

#### ***d) Przemysł Chemiczny: toryfikaty jako biosorbenty***

- 1.05.2022-1.05.2023 Główny wykonawca – LIDER X, (Główny wykonawca B+R – 0.25 etatu umowa o dzieło): Specjalista ds. Wymiany Ciepła: Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Technologii Paliw. Temat: „Prognozowanie dystrybucji Hg i As w procesie spalania węgla kamiennych i brunatnych w kotłach pyłowych i oczyszczania spalin z wykorzystaniem modeli regresyjnych i sieci neuronowych”, Działania 1.2 „LIDER X” NCBiR 2014-2020 (0183/L-10/2018). Zakres obowiązków: Opracowanie modeli regresyjnego i sztucznych sieci neuronowych dla danych z elektrowni Bełchatów: Zadanie 1. Opracowanie wstępnego modelu regresyjnego, Zadanie 2. Opracowanie wstępnego modelu sztucznych sieci neuronowych, Zadanie 3. Przygotowywanie raportu końcowego, prezentacja wyników podczas konferencji naukowych, opracowywanie publikacji naukowych.

Wartość projektu: 1 465 361,25 PLN

- 1.04.2021-1.10.2021 Główny wykonawca – “Program grantowy na prace B+R jednostek naukowych”, (Główny wykonawca B+R – 0.3 etatu): Specjalista ds. Toryfikacji Biomasy: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Chemiczny, Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej Temat: „BioActivCarbon – produkcja węgla aktywnego na bazie toryfikacji Słonecznika Bulwiastego - Topinambura i OXYTREE”, “Podkarpackie Centrum Innowacji” w ramach RPO Województwa Podkarpackiego na lata 2014-2020. Zakres obowiązków: Opracowanie projektu i wykonanie instalacji do toryfikacji parą przegrzaną biomas w celu wytwarzania węgla aktywnego, przygotowywanie raportu końcowego, prezentacja wyników podczas konferencji naukowych, opracowywanie publikacji naukowych. Wartość projektu: 199 400,00 zł PLN

Wskazane powyżej działania potwierdzają szerokie możliwości aplikacyjne opracowanych rozwiązań.

#### ***4.4. Wkład w rozwój dyscypliny***

Osiągnięte rezultaty oraz zdefiniowane wnioski stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny i stanowią komplementarne oraz utylitarne rozwiązania w zakresie zagospodarowania biomasy na cele energetyczne i dla rolnictwa na przykładzie słomy z kukurydzy, słomy z owsa, Miskantusa, zrębki drzewnej – sosny i osadów z oczyszczalni ścieków. Zakres przeprowadzonych prac obejmuje zarówno obszar badań podstawowych (projekt NCN, projekt NAWA Mieczysława Bekkera) jak również prac rozwojowych (projekt Lider BIOCARBON, projekt BioTrainValue dofinansowany w ramach Marie Skłodowskiej-Curie Staff Exchange - Horyzont Europa) realizowanych z partnerami zagranicznymi i przemysłowymi co stanowi o dużym poziomie innowacyjności proponowanych rozwiązań.

Prace w zakresie wytworzenia biowęgla: BIOCARBON „Nowoczesna technologia toryfikacji biomasy do produkcji blendów paliwowych, biowęgla jako dodatku do nawozów oraz węgla aktywnego dla potrzeb energetyki, rolnictwa, budownictwa i przemysłu chemicznego”, Działania 1.2 „LIDER IX” NCBiR 2014-2020 (0155/L-9/2017)

Opracowane i opisane procesy toryfikacji biomas przeprowadziłem w ramach realizacji dwóch projektów międzynarodowych (w których byłem głównym wykonawcą badań w zakresie toryfikacji biomasy):

- a) 01.07.2022-31.06.2024 Stypendium im. Mieczysława Bekkera NAWA: Adiunkt Naukowy „BioGainValue Badania nad procesem toryfikacji biomasy z wykorzystaniem pary przegrzanej oraz właściwościami nowych biomateriałów”: BPN/BEK/2021/1/ 00248 Narodowy Instytut Chemii, Katedra Katalizy i Inżynierii Reakcji Chemicznych: (SŁOWENIA, Lubljana) –Opiekun Naukowy prof. Blaž Likozar.
- b) 2.01.2023-31.12.2026 Koordynator Projektu (koordynator całego konsorcjum) HORIZON-MSCA-SE-2021 (Marie Skłodowska-Curie Staff Exchange), BioTrainValue: „BIOmass Valorisation via Superheated Steam Torrefaction, Pyrolysis, Gasification Amplified by Multidisciplinary Researchers TRAINing for Multiple Energy and Products’ Added VALUEs”: <https://cordis.europa.eu/project/id/101086411/pl> ; <http://biotrainvalue.eu/> , Projekt nr. 101086411 we współpracy z :  
TUL - Polska-Politechnika Łódzka – Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska – (Koordynator BioTrainValue: dr inż. Szymon Szufa)  
APS - Polska – APS-Ekoinnowacje Sp. z o.o. – (Lider Piotr Piersa) – Partner Przemysłowa  
3) TUC: Politechnika Kreteńska: - Wydział Inżynierii Środowiska, Kreta, Grecja (Lider Prof. Stelios Rozakis) – Partner Naukowy  
4) WHZ Uniwersytet Techniczny Zwickau, Niemcy – Wydział Businessu i Ekonomii – (Lider: Prof. Dr. rer. pol. Dr. h.c. mult. H.- Christian Brauweiler – Partner Naukowy  
5) NIC - Narodowy Instytut Chemii, Katedra Katalizy i Inżynierii Reakcji Chemicznej, Lubljana Słowenia (Lider: Prof. Dr. Blaž Likozar, Assist. Professor) – Partner Naukowy  
6) BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH – Graz Austria (Lider: Dr Elisabeth Wopienka) – Partner Przemysłowy.  
7) Müller Abfallprojekte GmbH – Weibern Austria (Lider: Stephan Hinterberger – Partner Przemysłowy  
8) Wielka Brytania - ASTON University (Lider: Prof. Jude Onwudili) – Partner Naukowy  
9) Wielka Brytania - PyroGenesys – Birmingham – (Lider: Dr Simon Ighofose) – Partner Naukowy  
10) ARIGNA FUELS – Arigna, Irlandia, (Lider: Dr Robert Johnson) – Partner Naukowy.  
Zakres obowiązków: zarządzanie projektem, oddelegowywanie naukowców do partnerów przemysłowych, przyjmowanie partnerów przemysłowych w jednostce naukowej, organizacja konferencji, sympozjów naukowych i spotkań zespołu zarządzającego konsorcjum, przygotowywanie grantów badawczo-rozwojowych, publikowanie monografii i artykułów naukowych, promocja projektu.

Wartość całego projektu: Wartość całego projektu: 1 251 200 EURO, w tym (184 000 EURO - POLSKA)

Natomiast opracowane metody torfikacji stały się podstawą podjęcia działań w zakresie ochrony własności intelektualnej tj. zgłoszeń patentowych (UP RP), w tym:

- Piersa P., Adrian Ł., Szufa S., Obraniak A., Modrzewski R., Granulator taśmowo-wibracyjny, zgłoszenie patentowe do UP RP, 7.06.2022, nr zgłoszenia P.441393, - mój % wkład wynosi 20%
- Piersa P., Adrian Ł., Szufa S., Obraniak A., Modrzewski R., Granulator bębnowo-wibracyjny, zgłoszenie patentowe do UP RP, 7.06.2022, nr zgłoszenia P.441394, mój % wkład wynosi 20%
- Piersa P., Adrian Ł., Szufa S., Wróbel K., Petrus R., Szukiewicz M., Sobolewska P., Sposób wytwarzania biosorbentu oraz biosorbent otrzymany tym sposobem - substrat Topinambur, zgłoszenie patentowe do UP RP, 24.01.2022, nr zgłoszenia P.440210, mój % wkład wynosi 20%
- Piersa P., Adrian Ł., Szufa S., Wróbel K., Petrus R., Szukiewicz M., Sobolewska P., Sposób wytwarzania biosorbentu oraz biosorbent otrzymany tym sposobem – substrat OxyTree, zgłoszenie patentowe do UP RP, 24.01.2022, nr zgłoszenia P.440211, mój % wkład wynosi 20%
- Zgłoszenie patentowe: „Układ instalacyjny elektrociepłowni hybrydowej zasilanej biomasą, energią słoneczną i energią wiatrową” do Urzędu Patentowego RP, 1.02.2012, Zgłoszenie patentowe, NUMER ZGŁOSZENIA P.399043, mój % wkład wynosi 20%
- Zgłoszenie patentowe: „Instalacja odzysku ciepła z procesu torfikacji biomasy bazująca na wymiennikach ciepła typu rurka ciepła” do Urzędu Patentowego RP, 1.02.2014 NUMER ZGŁOSZENIA P. 407407, mój % wkład wynosi 20%

**5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Oprócz działań wymienionych w pkt. 4.2 oraz 4.3 w zakresie aktywności naukowej wskazuję ponadto:

*a) realizacja innych projektów:*

- 1.07.2021-31.10.2023 POSTDOC (0.5 fte), Adiunkt Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, “BECoop-Unlocking the community energy potential to support the market uptake of bioenergy heating technologies”, <https://www.becoop-project.eu/> , The project BECoop has received funding from the European Union’s Horizon 2020 Research and innovation programme under grant agreement No 952930. Zakres obowiązków: Analiza systemów polityki bioenergetycznej i współpracy klastrów bioenergetycznych w Polsce i Europie. Analiza potencjału energetycznego gminy dla celów bioenergetycznych i stworzenie pierwszej spółdzielni energetycznej w Polsce. Wartość projektu: 197 500 € (Partner)
- 1.01.2020-1.11.2020 Kierownik Prac B+R WEDISTRICT (Horyzont 2020) <https://www.wedistrict.eu/> (Kierownik Prac B+R – 0.5 etatu): PGNiG TERMIKA

Energetyka Rozproszona Sp. Z o.o. (<https://termika.pgnig.pl/en/>): “WEDISTRICt Smart and local reneWable Energy DISTRICt heating and cooling solutions for sustainable living”. Grant nr. 857807, <https://cordis.europa.eu/project/id/857801>, Smart and local renewable Energy DISTRICt heating and cooling solutions for sustainable living

Zakres obowiązków: Prowadzenie bezpośredniego nadzoru nad realizacją projektu WEDISTRICt (HORIZON 2020). Udział w radach i spotkaniach w trakcie realizacji projektu, udział w procedurach zakupowych w zakresie negocjacji technicznych, udział w lokalnych wizjach związanych z projektem wdrożenie, tworzenie i weryfikacja wstępnych analiz efektywności ekonomicznej, dokumentacji projektowej, badań, narzędzi obliczeniowych wykonywanych przez podmioty zewnętrzne na rzecz Spółki. Wartość projektu: 19 273 573,13 EUR; wkład UE 14 972 852,64 €

- 1.10.2017-31.06.2018 Współzarządzający projektem (0.25 etatu – umowa o pracę) i główny wykonawca grantu (0.5 etatu umowa o pracę) (Specjalista ds. Paliw): „Kocioł opalany biomasa do zastosowań suszarniczych”, ENSYS S.C., Grant z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) Inteligentny Rozwój, Szybka Ścieżka dla MŚP POIR.01.01.01-00-0460/17): <http://ensys.pl/>  
Zakres obowiązków: zarządzanie projektem (Kierownik Zarządzający Projektem), badania analizowanego paliwa, określenie wpływu paliwa na proces spalania, wyznaczenie zawartości zanieczyszczeń, oznaczanie zawartości pierwiastków w stałych próbkach biomasy, współudział w budowie modelu kotła, budowa stanowiska badawczego, realizacja badań kotła na stanowisku, opracowywanie i analizy systemu sterowania pracą kotła, przygotowanie raportów B+R. Wartość projektu: 570 258 PLN
- 9.02.2015-31.07.2015 „TEDS4BEE”-Testing of Digital Services for Building Energy Efficiency”. Nr. 325160, CIP - Competitiveness and Innovation Programme: <https://www.cedint.upm.es/en/project/teds4bee>. Celem projektu było badanie możliwości ograniczania emisji gazów cieplarnianych w budynkach publicznych w Europie dzięki zastosowaniu innowacyjnych usług cyfrowych zwiększających efektywność energetyczną. Projekt realizowany w ramach Programu Ramowego na rzecz Konkurencyjności i Innowacyjności, ICT Policy Smart Programme for Smart Cities. Liderem projektu była hiszpańska firma FERROVIAL SERVICIOS SA. Rolą CBI Pro-Akademia jest współpraca przy wdrażaniu rozwiązań ICT dedykowanych poprawie efektywności energetycznej w siedzibie Urzędu Marszałkowskiego Województwa Łódzkiego. Obowiązki: Prowadzenie komunikacji z partnerami projektowymi. Uzupełnienie dokumentacji projektowej zgodnie z wymaganiami projektowymi. Reprezentowanie wykonawcy na spotkaniach dotyczących realizacji projektu.

*b) współpraca z innymi zagranicznymi jednostkami badawczymi*

- ASTON University, Energy and Bioproducts Research Institute (EBRI), Birmingham, Wielka Brytania (zakres: inżynieria chemiczna, piroliza biomasy, oleje pirolityczne, produkty uboczne pirolizy i toryfikacji, fenole, katalizatory)
- BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH, Graz, Austria (zakres: inżynieria chemiczna, toryfikacja, piroliza i zgazowanie biomasy)

- National Institute of Chemistry, Katedra Katalizy i Inżynierii Reakcji Chemicznej, Ljubljana, Słowenia (zakres: inżynieria chemiczna, toryfikacja, zgazowanie, hydrotermiczna karbonizacja, katalizatory zeolitowe)
- Politechnika Kreteńska, Wydział Inżynierii Środowiska, Kreta, Grecja (zakres: inżynieria chemiczna, inżynieria środowiska, analiza techniczno-ekonomiczna, analiza LCA, CCA, SLCA)
- WHZ Zwickau - Uniwersytet Techniczny Zwickau, Niemcy, Wydział Businessu i Ekonomii oraz Wydział Elektryczny, Zwickau, Niemcy (zakres: inżynieria procesowa, wytwarzania energii elektrycznej z pary przegrzanej w instalacji do toryfikacji biomasy)
- National University of Ireland Galway, Galway, Irlandia (zakres: inżynieria chemiczna, hydrotermiczna karbonizacja, modelowanie reaktorów)
- Politechnika w Żytomierzu, Zhytomyr Oblast, Ukraina (zakres: inżynieria chemiczna, toryfikacja, zgazowanie biomasy)

*c) współpraca z innymi krajowymi jednostkami badawczymi*

- Politechnika Łódzka, Wydział Biotechnologii i Nauki o Żywności (zakres: inżynieria chemiczna, inżynieria materiałowa, biotechnologia, gospodarka o obiegu cyrkularnym)
- Uniwersytet Łódzki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Katedra Ekofizjologii Roślin (zakres: inżynieria środowiska, biomasa, fitoremediacja)
- Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energii i Paliw (zakres: inżynieria chemiczna, biosorbenty do wychwytywania metali ciężkich ze spalin)
- Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Biogospodarki Stosowanej (zakres: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, produkcja energii elektrycznej i ciepłej z biomasy w ciepłowniach i biogazowniach, promocja spółdzielni energetycznych)
- Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk (zakres: inżynieria chemiczna, piroliza stróżyn garbarskich, biowęgle ze stróżyn garbarskich jako nawozy)
- Uniwersytety Rolniczy im. Hugo Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki. Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki (zakres: inżynieria chemiczna, suszenie i toryfikacja biomasy)
- Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Opole (zakres: inżynieria chemiczna, toryfikacja i zgazowanie biomasy)
- IUNG Instytut Nawożenia i Gleboznawstwa Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów (zakres: inżynieria środowiska, biowęgle jako strukturyzatory gleby, nawozy)
- Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny (zakres: inżynieria chemiczna, współspalanie biomasy z węglem)
- Politechnika Wrocławska, Wydział Chemii (zakres: inżynieria chemiczna, piroliza stróżyn garbarskich, biowęgle ze stróżyn garbarskich jako nawozy)
- Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska (zakres: inżynieria chemiczna, współspalanie biomasy z węglem)
- Instytut Technologiczno - Przyrodniczy. Zakład Doświadczalny (zakres: inżynieria chemiczna, produkcja biogazu, zagospodarowanie pofermentu)

- Politechnika Śląska, Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyk, Katedra Ogrzewnictwa Wentylacji i Techniki Odpylania (zakres: inżynieria chemiczna, toryfikacja biomasy)
- Politechnika Rzeszowska, Wydział Chemiczny, Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Rzeszów (zakres: inżynieria chemiczna, biosorbenty, filtracja, oczyszczanie wód)
- Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Ekonomii i Finansów / Katedra Innowacji i Przedsiębiorczości (zakres: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, analizy techniczno-ekonomiczne, analiza LCA)

**6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

- a) Promotor pomocniczy dwóch doktoratów, jeden realizowanych w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej ISD PŁ (dyscyplina: inżynieria chemiczna):
  - „Integracja innowacyjnego procesu toryfikacji w parze przegrzanej biomasy drzewnej i rolniczej wraz ze stałymi pozostałościami biogazu (BSR) za pomocą pary przegrzanej na mokro w celu maksymalnego odzysku ciepła w zastosowaniach przemysłowych”
  - „Toryfikacja biomasy z wykorzystaniem pary przegrzanej, zagospodarowanie produktów ubocznych”
- b) POLITECHNIKA ŁÓDZKA Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska: Opiekun Dydaktyczny Praktyk Studenckich - Inżynieria Środowiska
- c) Od 1.03.2023 r. – KOORDYNATOR Inicjatywy 3W (projekt BGK) w zakresie Inżynieria Środowiska dla Politechniki Łódzkiej
- d) Od lipca 2023, KOORDYNATOR z ramienia Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska (obszar: ochrona środowiska) zadań w sieci ECIU - European Consortium of Innovative Universities (Europejskie Konsorcjum Innowacyjnych Uniwersytetów): <https://eciu.p.lodz.pl/pl/eciu-i-pl/co-jest-eciu>
- e) W okresie 2015-2019 przeprowadzenie ponad 1500 godzin szkoleniowych w ramach projektów europejskich w większości kończących się egzaminem UDT dla nowych instalatorów: paneli fotowoltaicznych, pomp ciepła, kotłów na biomasę małej mocy, kolektorów słonecznych.
- f) 2009-2014 Prowadziłem następujące zajęcia dydaktyczne: Termodynamika Techniczna : laboratorium, ćwiczenia; Termodynamika: ćwiczenia; Technologie Informacyjne: laboratorium, Informatyka: laboratorium, Metrologia: ćwiczenia, laboratorium
- g) Współpraca z Działem Promocji Politechniki Łódzkiej (Promocja Politechniki Łódzkiej i przeprowadzania prezentacji w technikach i liceach łódzkich wśród maturzystów)
- h) 2011-2012, Vice-przewodniczący Samorządu Doktorantów PŁ
- i) 2011-2012 Członek Rady Samorządu Doktorantów PŁ
- j) 2011-2012 Członek Uczelnianej Komisji Wyborczej
- k) 2011-2012 Członek Doktoranckiej Komisji Wyborczej
- l) 2010-2012 Delegat Samorządu Doktorantów PŁ
- m) 1.10.2019-31.09.2022 Ekspert w Grupie Operacyjnej: National Task Force w projekcie NUTRI2CYCLE H2020 (grant nr. 773682): „Transition towards a more carbon and nutrient efficient agriculture in Europe”: <https://www.nutri2cycle.eu/>, <https://is.pcz.pl/pl/o-projekcie-nutri2cycle> ,
- n) Ekspert oceniający projekty badawczo-rozwojowe Horyzont Europa;

- o) Ekspert Narodowego Centrum Badań i Rozwoju - NCBR w Warszawie w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój POIR: certyfikowany ekspert nauki i gospodarki w dziedzinach: wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i powietrze do układów klimatyzacyjnych: wytwarzanie, przesyłanie, dystrybucja i handel energią elektryczną; wytwarzanie energii elektrycznej; wytwarzanie paliw gazowych
- p) Członek grupy roboczej Krajowej Inteligentnej Specjalizacji KIS-7: „Gospodarka o obiegu zamkniętym”, Ciało doradcze pracujące przy Ministerstwie Rozwoju
- q) Ekspert Ministerstwa Energii i Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko – POIŚ: Działania 7.1 Rozwój Inteligentnych Systemów Magazynowania, Przesyłania i Dystrybucji Energii Priorytetu VII Poprawa Bezpieczeństwa Energetycznego
- r) Ekspert Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju oraz Banku Gospodarstwa Krajowego Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój: Działania 2.1 „Wsparcie Inwestycji W Infrastrukturę B+R Przedsiębiorstw” W Latach 2016-2017 ocenionych 17 wniosków w Ramach KIS 7 i KIS 8), Poddziałania 3.2.1 „Badania Na Rynek” (ocenionych kilkanaście wniosków), Poddziałania 3.2.2 „Kredyt Na Innowacje Technologiczne” (W latach 2015-2018 – ocenionych 140 wniosków wraz z biznes planami), Konkursu o nadanie statusu Krajowego Klastra Kluczowego (KKK) (Zgłoszony), Poddziałania 2.3.1 „Proinnowacyjne Usługi IOB Dla MŚP” (Zgłoszony), Poddziałania 2.3.2 „Bony Na Innowacje dla MŚP” (Zgłoszony), Poddziałania 2.3.3 „Umiejdzynarodowienie Krajowych Klastrów Kluczowych” (Zgłoszony), Poddziałania 2.3.4 „Ochrona Własności Przemysłowej” (Zgłoszony), Poddziałania 3.1.5 „Wsparcie MŚP w dostępie do rynku kapitałowego - 4 Stock” (Zgłoszony), Działania 3.3 „Wsparcie promocji oraz internacjonalizacja innowacyjnych przedsiębiorstw” (Zgłoszony). W obszarach: Innowacyjność, Energetyka-Konwersja Energii, Odnawialne Źródła Energii, Wykonywanie Ekspertyz Dla BGK Banku Gospodarki Krajowej W Ramach: : Kredytu Technologicznego – Przeprowadzenie Oceny 140 Projektów Inwestycyjnych Wraz Z Biznesplanami)
- s) Ekspert Państwowej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości – PARP: POIR (Energetyka, odnawialne źródła energii, konwersja paliw), POWER (doradztwo strategiczne). Ocena wniosków w ramach konkursu dla MŚP i dużych firm: „Badania na Rynek”.
- t) Ekspert Fundacji Na Rzecz Nauki Polskiej – FNP. Krasickiego 20/22, 02-611 Warszawa, Polska. [www.fnp.org.pl](http://www.fnp.org.pl)
- u) Akredytowany doradca Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju oraz Agencji Rozwoju Przemysłu s. a. (Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości w Łodzi) w ramach projektu grantowego: „Sieć Otwartych Innowacji” POIR 2014-2020 i komponent Działanie 2.2 Otwarte innowacje – wspieranie transferu technologii
- v) Ekspert Regionalnych Programów Operacyjnych Woj. Mazowieckie: Ekspert zewnętrzny w ramach: OŚ PRIORYTETOWA IV: Przejście na gospodarkę niskoemisyjną Kogeneracja, centralne ogrzewanie, sieci ciepłownicze, Ochrona powietrza, Czysty transport miejski, Plan gospodarki niskoemisyjnej, Dostosowanie do zmian klimatu Gospodarka odpadami, OŚ PRIORYTETOWA V, Gospodarka przyjazna środowisku, Dostosowanie do zmian klimatu, Gospodarka odpadami
- w) Akredytowany konsultant Państwowej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości PARP (PARP: szkolenia, doradztwo proinnowacyjne, ogólne)

- x) Akredytowany doradca Ministerstwa Przedsiębiorczości i Technologii: [www.mpit.gov.pl](http://www.mpit.gov.pl) (audyty innowacyjności, doradztwo innowacyjności, doradztwo technologiczne) – naczelną organizacją techniczną w Łodzi (NOT Łódź) [www.not.lodz.pl](http://www.not.lodz.pl)
- y) Akredytowany doradca Centrum Współpracy z Gospodarką, Innowacji i Transferu Technologii Politechniki Łódzkiej w zakresie: audyty innowacyjności, doradztwo innowacyjności, audyty wzorniczy
- z) Członek Klastra Bioenergia dla Regionu – Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia ul. Innowacyjna, Konstancin Łódzki (woj. łódzkie)
- aa) Członek Stowarzyszenia TOP500 Innovators: [www.top500innovators.org](http://www.top500innovators.org)
- bb) Editorial Board – Energies MDPI (2 Special Issue): Special Issue "Biomass Torrefaction and Its Applications in Low-Carbon Industry";
- cc) Recenzent artykułów naukowych, w tym ELSEVIER (Biomass and Bioenergy, Fuel Processing Technology), SPRINGER (Scientific Reports, Biomass Conversion and Biorefinery, MDPI (Energies, Materials, Catalysts, Processes, Sustainability) FRONTIERS (FRONTIERS IN ENERGY)
- dd) Ekspert Fundacji na rzecz Nauki Polskiej
- ee) Uzyskane nagrody:
- STYPENDIUM MINISTRA EDUKACJI NARODOWEJ DLA WYBITNYCH MŁODYCH NAUKOWCÓW: <https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/ogloszenie-wynikow-postepowania-w-sprawie-przyznania-stypendiow-ministra-nauki-i-szkolnictwa-wyzszego-dla-wybitnych-mlodych-naukowcow-w-2021-r>
  - Laureat Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2019 pod patronatem Prezesa Urzędu Patentowego RP dr Alicji Adamczak w kategorii: Naukowiec Przyszłości
  - 2020-2023 Nagrody Rektora (15 nagród) za osiągnięcia naukowe: „Wspieranie doskonałości naukowej Politechniki Łódzkiej”
  - 1.06.2014-1.10.2014 Stypendysta programu : „Nauka drogą do biznesu - program stypendialny dla doktorantów z woj. łódzkiego” <http://www.hrpgroup.com.pl/>, Łódź
  - Stypendium Marszałka Województwa Łódzkiego dla Wybitnych Młodych Naukowców 2014
  - Nagroda Krajowy Lider Innowacji i Rozwoju - 2012 INNOWACYJNY PROJEKT UNIJNY STOWARZYSZENIE MINISTERSTWO ROZWOJU REGIONALNEGO Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości i Giełdę Papierów Wartościowych
  - 01.01.2012 – 1.03.2014 Trzykrotny Stypendysta Stypendium doktoranckiego z dotacji podmiotowej na dofinansowanie zadań projektowych
  - 01.05.2012-31.12.2013 Stypendium Naukowe Dla Najlepszych Doktorantów z Zakresu Nowych Technologii. Projekt realizowany w ramach projektu POKL działanie 8.2. Transfer wiedzy, poddziałanie 8.2.1 Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki. Temat badań: „Toryfikacja i współspalanie biomasy-Modelowanie procesów”
  - 24.10.2011-31.03.2012 Stypendium "Asystent Innowacji - adaptacja rozwiązań wspomagających współpracę sfery nauki i biznesu z regionu Dolnej Austrii w województwie łódzkim" realizowanym w partnerstwie z Rządem Dolnej Austrii Amt der NO Landesregierung, Abteilung Wirtschaft, Tourismus, Technologie (WST3). (Staż w Dalkii Łódź S. A.). Temat badań: „Toryfikacja Współspalanie biomasy. Modelowanie procesów.”



- 01.05.2011-31.12.2011 – Stypendium ze Stypendialnego Funduszu Młodych Naukowców na Wydziale Mechanicznym PŁ, Temat Badań: „Toryfikacja i współspalanie biomasy. Modelowanie Procesów”
  - 1.02.2011-1.02.2012 – Stypendium Bioenergia dla Regionu, Klaster Bioenergia dla Regionu – Zintegrowany Program Rozwój Doktorantów. Projekt miał na celu zwiększenia udziału doktorantów w transferze wiedzy i wzmocnienia powiązań sfery badawczo-rozwojowej z przedsiębiorstwami na rzecz rozwoju gospodarczego województwa łódzkiego w zakresie energetyki odnawialnej. [www.bioenergiadlaregionu.eu](http://www.bioenergiadlaregionu.eu) Temat badań: „Toryfikacja i współspalanie biomasy. Modelowanie Procesów”
  - 01.01.2012-31.12.2012 Stypendium doktorskie z Własnego Funduszu Stypendialnego Politechniki Łódzkiej przyznane przez Prorektora do spraw Nauki PŁ prof. dr hab. inż. Ireneusza Zbicińskiego. Temat badań: „Toryfikacja i współspalanie biomasy. Modelowanie procesów”.
  - 01.05.2011-31.12.2011 – Stypendium ze Stypendialnego Funduszu Młodych Naukowców na Wydziale Mechanicznym PŁ. Temat Badań: „Toryfikacja i współspalanie biomasy. Modelowanie procesów”
  - 1.10.2009-1.03.2014 – Pięciokrotny Stypendysta Stypendium Rektora Politechniki Łódzkiej dla Najlepszych Doktorantów za wyniki w nauce
  - 1.10.2009-31.09.2013 Stypendium Doktoranckie
  - 2008 - Wyróżnienie w konkursie za najlepszą pracę magisterską w dziedzinie nowoczesnych technologii organizowanym przez firmę „Transition Technologies” Politechnika Łódzka, Nagroda
  - 2003-2008 - Nagrody Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej za wyniki w nauce (5 lat z rzędu),
- ff) Działania w zakresie popularyzacji nauki:
- Publikacje branżowe o zasięgu ogólnokrajowym, Dziennik Gazeta Prawna 2021, Puls Biznesu, kwiecień 2019
  - MENTOR w PROGRAMIE TOPMINDS EDYCJA 2019: <http://topminds.pl/>
  - EKSPERT ZEWNĘTRZNY W KAMPANII „NIE RÓB DYMU” (Fleishman-Hillard Sp. z o.o. oraz KRATKI.PL S.A.). Kampania ma na celu promowanie czystego i poprawnego spalania oraz ekologicznego paliwa w postaci biomasy drzewnej wykorzystywanego w piecach i kominkach małej mocy w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń, poprawy stanu środowiska poprzez ograniczenie powstawania smogu: <http://nierobdymu.org>
  - publikacje na portalach: <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C33050%2Cpaliwo-i-biowegiel-z-biomasy.html>  
<https://rzecz.pl/technologie-potrzebna-energetyce/>  
<https://test.magazynbiomasa.pl/trudna-walka-ze-spalaniem-smieci/>
- 7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

- 4.02.2015-obecnie Właściciel firmy: BIOMASS TRAINING RESEARCH Szymon Szufa, PKD 72.1 Badania naukowe i prace rozwojowe w dziedzinie nauk przyrodniczych i technicznych, PKD 85.59.B Szkolenia z obszaru technologii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Szarych Szeregów 25a/14, Opole 45-286. Zakres obowiązków: śledzenie trendów rozwoju technicznego, analiza szans i zagrożeń dla rozwoju firmy, realizacja ekspertyz i szkoleń z zakresu OZE. Realizacja szkoleń specjalistycznych oraz doradztwa strategicznego.
- 1.03.2016-13.12.2018 Wiceprezes Zarządu, APS-Ekoinnowacje Sp. z o.o. BioNanoPark Sp. z o.o.93-465 Łódź, ul. Dubois 114/116, lokal nr.e-mail: [biuro@aps-ekoinnowacje.pl](mailto:biuro@aps-ekoinnowacje.pl), [www.aps-ekoinnowacje.pl](http://www.aps-ekoinnowacje.pl). Zakres obowiązków: Proekologiczne doradztwo strategiczne, koordynowanie działalności badawczo-rozwojowej oraz tworzenie planów prac, koordynowanie działań związanych z pozyskaniem źródeł finansowania projektów i inwestycji organizowanie współpracy z zewnętrznymi jednostkami: podwykonawcami, instytucjami badawczymi, zarządzanie standardami jakości i wsparcie procesów produkcyjnych, inicjowanie oraz organizacja i zarządzanie procesem prac badawczo-rozwojowych ukierunkowanych na realizację założeń strategii firmy, tworzenie i rozwój bazy wiedzy oraz standardów technicznych firmy, zapewnienie transferu wiedzy technicznej wewnątrz organizacji, planowanie, zarządzanie biurem oraz zespołem podległych pracowników.
- 16.11.2009 -1.04.2010 Pöyry Forest Industry Sp. z o.o. (Łódź, Polska) [www.poyry.com](http://www.poyry.com). Stanowisko: Inżynier Projektowy. Zakres obowiązków: Projektowanie instalacji ciepłych (paro-kondensat) dla elektrociepłowni pracujących przy wytwórniach papieru. montaż elementów aparatury, montaż izolacji, montaż elementów kontrolno-pomiarowych i uruchomienie wstępne instalacji pilotażowej;
- 1.10.2009-14.11.2009 RWE Stoen Operator Sp. z o.o. (Warszawa, Polska) [www.rwe.pl](http://www.rwe.pl) Stanowisko: Młodszy Specjalista: "Program Trainee". Wydział: Planowanie Sieci i Zarządzanie Projektami. Zakres pracy: Planowanie modernizacji sieci średniego napięcia.
- 18.08.2009-30.09.2009 Energetyka Ciepła Opolszczyzny S.A. (Opole, Polska) <http://ecosa.pl>, Elektrociepłownia. Stanowisko: Inspektor ds. technicznych. Wydział: Działu Planowania i Monitoringu Operacyjnego. Zakres obowiązków: Analiza i monitoring bieżących procesów technologicznych przy użyciu programów SCADA (Pro 2000). Planowanie Sprzedaży, piecza nad zakupem opału dla całej spółki ECO SA. Pomoc przy projektach sieci ciepłej i inwestycjach eksploatacyjnych.
- 27.11.2008–17.12.2008 Troll WindPower (Bergen, Norwegia) [www.trollwindpower.no](http://www.trollwindpower.no) Stanowisko: Praktykant Temat pracy: Wind Energy Simulator - Symulator Energii Wiatru, Zakres obowiązków: Stworzenie skryptu łączącego dwa główne programy służące do modelowania zmian energii wiatru na morzach i oceanach WindSim oraz służącego do obliczeń strat energii w sieci elektroenergetycznej DigSILENT Power Factory. WES to procedura służąca do optymalizacji mocy elektrowni wiatrowej poprzez znajdowanie optymalnej konfiguracji turbin wiatrowych i systemu elektrycznego.
- 01.04.2008– 6.10.2008 ABB Wrocław Sp. z o.o. (Wrocław, Polska) [www.abb.pl](http://www.abb.pl) Stanowisko: Referent ds. Projektowania, Projekt 1: Skopje, Macedonia.Zakres pracy: Praca nad przygotowaniem regulatora turbiny kondensacyjnej. Przygotowanie i implementacja logik sterujących silnikami pomp, zaworami, wentylatorami itp. oraz ich implementacja w systemie. Czynny udział podczas testów FAT. Projekt 2: Yenikoy, Turcja.

Zakres pracy: Praca nad przygotowaniem algorytmów i logik sterujących obrotowym podgrzewaczem powietrza typu LUVO. Przygotowanie sekwencji sterujących przy załączaniu w różnych trybach: soft-start, twarde załączanie itp., przygotowanie dokumentacji technicznej przy użyciu programu AutoCad.

Odbyte szkolenia:

- 11.07.2015-11.09.2015 TOP500 INNOVATORS: [www.top500innovators.org](http://www.top500innovators.org). University of Cambridge, University of Oxford, Top 500 Innovators – Science, Management, Commercialization, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Największy rządowy program wspierania innowacyjności w nauce. Programy stażowo-szkoleniowe dla naukowców w najlepszych ośrodkach akademickich na świecie w zakresie zarządzania badaniami i komercjalizacja ich wyników. Projekt był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet IV, Działanie 4.2, The Old School, Trinity Ln, Cambridge, CB2 1 TN, Wielka Brytania. Zakres szkoleń: Udział w szkoleniach: z tworzeniem innowacji: (od pomysłu do koncepcji do przedsiębiorstwa / działalności, kultura prototypowania i weryfikowania prototypów, innowacje produktowe i usługowe, strategie innowacyjne, praca w zespole ukierunkowanym na działania proinnowacyjne); - z biznesem – zakładaniem i prowadzeniem biznesu: (podejmowanie i analiza decyzji, zarządzanie zespołem, strategie biznesowe oraz modele biznesowe); - z oceną i wyceną technologii pod kątem jej komercjalizacji: (ochrona własności intelektualnej, ocena oraz rozwój pomysłów / technologii, konkurencja oraz perspektywy rynkowe technologii / produktu. Wizyty w parkach naukowo-technologicznych, Praca w zespołach nad komercjalizacją wyników projektów B+R. Wartość projektu: 35 000 000 PLN
- Zarządzanie projektami badawczymi, projekt Lider IX, NCBiR 2019
- 25.09.2014-03.12.2014 „Komunikacja i negocjacje w relacjach biznesowych”
- Ukończone Szkolenie: „Wykorzystanie nowoczesnych technologii w komercjalizacji wyników badań”, [16h] Instytucja: HRP GROUP
- 27.08.2014-28.08.2014, „Wykorzystanie nowoczesnych technologii w komercjalizacji wyników badań”, Ukończone Szkolenie: „Autoprezentacja i profesjonalne wystąpienia publiczne” [24h], Instytucja: HRP GROUP
- 17.06.2014-10.07.2014, „Autoprezentacja i profesjonalne wystąpienia publiczne”, Ukończone Szkolenie: „Integracja” [8h], Instytucja: HRP GROUP
- 26.05.2013 – Bełchatowsko – Kleszczowski Park Technologiczny. Szkolenie „Pozyskiwanie środków na badania naukowe i projekty badawcze – praktyczne warsztaty”
- 24.05.2013 – Grupa VPT training coaching consulting Violetta Post. Szkolenie „Negocjacje i autoprezentacja”
- 23.05.2013 – Politechnika Łódzka. Szkolenie „Regulacje prawne dot. Transferu technologii obowiązujące na Politechnice Łódzkiej”
- 25.05.2012 – Otawa Group Grupa Doradcza „Komercjalizacja pomysłów naukowych”
- 27.05.2012 – Otawa Group Grupa Doradcza „Pozyskiwanie środków na komercjalizację pomysłów naukowych”
- 26.05.2012 – Otawa Group Grupa Doradcza „Spin off/spin out przedsiębiorstwa powstające na styku uczelni i przemysłu”
- 6.02.2012 - Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: „Pozyskiwanie funduszy na komercjalizację badań i innowacyjny rozwój firm” – Asystent Innowacji

- 26.01.2012 – Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Zarządzanie projektami innowacyjnych wdrożeń w firmie”* – Asystent Innowacji
- 10.01.2012 – Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Zarządzania własnością intelektualną”* – Asystent Innowacji
- 1.12.2011 Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„LEAN management”* – Asystent Innowacji
- 29.11.2011 Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Introduction to innovations-innovation as a term; tools to Assos innovativeness of the company; role of AI in the company; introduction to the SWOT analysis; types of Project realized in Lower Austria ”* – Asystent Innowacji
- 21.11.2011 Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Budowa proinnowacyjnej strategii rozwoju firmy-case study- praca w grupach”* – Asystent Innowacji
- 24.10.2011 Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Budowa proinnowacyjnej strategii rozwoju firmy-Analiza SWOT jako punkt wyjścia do oceny przedsiębiorstwa”* – Asystent Innowacji
- 21.10.2011 Fundacja Rozwoju Przedsiębiorczości: *„Budowa proinnowacyjnej strategii rozwoju firmy-Pojęcia, cele i narzędzie strategiczne dla przedsiębiorstwa”* – Asystent Innowacji
- 2.06.2011 - Szkolenie Google Apps – Agencja Bluerank Certyfikat 2011/GAP/02/06/0025
- 4-5.04.2011 - Szkolenie: *„Nowoczesne i ekonomiczne źródła ciepła”*, Głubczyce, woj. opolskie, Galmet - technika grzewcza
- 4-5.04.2011 - Szkolenie: *„Odnawialne źródła ciepła - systemy słoneczne”*, Głubczyce, woj. opolskie, Galmet - technika grzewcza
- 4-5.04.2011 - Szkolenie: *„Odnawialne źródła ciepła – pompy ciepła”*, Głubczyce, woj. opolskie, Galmet - technika grzewcza
- 5-18.02.2010 - Szkolenie: *„Tworzenie geometrii (Ansys Design Modeler), siatek (Ansys Meshing) oraz wymiany ciepła i przepływu (Ansys CFX)”*

.....  
(podpis wnioskodawcy)