

dr hab. inż. Mariusz Kuglarz, prof. UBB
Uniwersytet Bielsko-Bialski
Wydział Inżynierii Materiałów,
Budownictwa i Środowiska
ul. Willowa 2
43-309 Bielsko-Biała
email: mkuglarz@ubb.edu.pl

Bielsko-Biała, 11.09.2026 r.

RECENZJA

osiągnięcia naukowego dr inż. Szymona Sobek

przedstawionego w postaci jednotematycznego cyklu publikacji pod wspólnym tytułem
„Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od
kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”

1. Podstawy formalne sporządzenia recenzji

Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały nr 75/2026, z dnia 18 czerwca 2026 roku Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Zgodnie z podjętą Uchwałą zostałem powołany do pełnienia funkcji recenzenta i członka komisji w postępowaniu habilitacyjnym Pana dr inż. Szymona Sobka. O decyzji powołującej moją osobę na recenzenta i członka komisji habilitacyjnej Pana dr inż. Szymona Sobek zostałem poinformowany pisemnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka - Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Labusa. Podstawą opracowania recenzji był przestany na mój adres służbowy, wydrukowany egzemplarz osiągnięcia naukowego wraz z załącznikami.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem niniejszej recenzji jest osiągnięcie naukowe pod wspólnym tytułem „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”. Dr inż. Szymon Sobek aplikuje o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego na podstawie zbioru jedenastu publikacji (oznaczonych w opisie osiągnięcie naukowe od A1 do A11), których tematyka wpisuje się w zakres reprezentowany przez wspólny tytuł osiągnięcia naukowego. Przedmiotem recenzji jest ocena, czy osiągnięcie naukowe Pana dr inż. Szymona Sobek, ubiegającego się o stopień doktora habilitowanego, odpowiada wymaganiom określonym w art. 221 ust. 5 Ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2024 r. poz. 1571, z późniejszymi zmianami).

3. Sylwetka naukowa kandydata

Dr inż. Szymon Sobek jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Śląskiej, związanym z Wydziałem Inżynierii Środowiska i Energetyki. Jego wykształcenie oraz dotychczasowy rozwój naukowy są konsekwentnie związane z obszarem energetyka i inżynieria środowiska. W latach 2012–2017 odbywał studia na kierunku Energetyka, o specjalności Modernizacja Instalacji Energetycznych, na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, a zwieńczeniem tego etapu kariery było uzyskanie tytułu magistra inżyniera. W latach 2017–2021 Pan Szymon Sobek kontynuował kształcenie w ramach studiów doktoranckich, w Katedrze Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej, uzyskując stopień doktora nauk technicznych (rozprawa doktorska „Badania eksperymentalne procesu solarnej pirolizy biomasy odpadowej”). Tematyka przedstawionej rozprawy doktorskiej wpisuje się w obszar badań związanych z energetycznym wykorzystaniem biomasy oraz jest związana z poszukiwaniem innowacyjnych rozwiązań, odpowiadających na współczesne wyzwania w zakresie transformacji energetycznej.

Od 1 października 2021 roku Pan dr inż. Szymon Sobek jest zatrudniony na Politechnice Śląskiej, na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki, w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Technik Odpylania, na stanowisku adiunkta. Tym samym, aktywność zawodowa i naukowa kandydata pozostaje związana z Jednostką, w której wcześniej realizował kształcenie na poziomie magisterskim i doktoranckim.

Zainteresowania naukowo-badawcze Pana Szymona Sobek, będące podstawą do uzyskania stopnia doktora, stanowiły bezpośrednią **podstawę** dalszego rozwoju naukowego i zostały znacząco poszerzone w cyklu publikacji stanowiących przedstawione osiągnięcie naukowe (publikacje naukowe A1 do A11). W osiągnięciu habilitacyjnym zachowano główny kierunek badań związany z termicznym przekształcaniem biomasy, który został jednak znacząco poszerzony o nowe substraty, nowe i/lub zintegrowane metody badawcze oraz oryginalne eksperymenty badawcze, w zakresie mechanizmów i kinetyki konwersji termochemicznej biomasy i substratów, charakterystykę produktów procesowych oraz ocenę oddziaływania środowiskowego metodą LCA.

Biorąc pod uwagę poszczególne etapy rozwoju kariery naukowej Habilitanta, można wyraźnie dostrzec Jego zainteresowania badawcze skierowane głównie na zagadnienia związane z procesami termicznego oraz termiczno-chemicznego przetwarzania odpadów (biomasy). W opinii Recenzenta, całokształt prowadzonych prac badawczych i uzyskanych wyników, stanowi podstawę do ubiegania się przez Pana dr inż. Szymona Sobek o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

4. Charakterystyka osiągnięcia naukowego

Przedstawione osiągnięcie naukowe zostało złożone do oceny w formie jednotematycznego cyklu 11 prac opublikowanych w czasopiśmie, które znajdują się na liście JCR (Journal Citation Reports). Zakres tematyczny wskazanego cyklu publikacji jest zgodny z wspólnym tytułem osiągnięcia naukowego „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”.

Charakterystyka cyklu publikacji oraz wkład w ich powstanie Pana dr inż. Szymona Sobek, stanowiących przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe, przedstawia się następująco:

- **[A1]** Sobek S, Mumtaz H, Sajdak M, Schmölzer S, Muzyka R, Werle S. Kinetic study of the decommissioned wind turbine blade oxidative liquefaction based on differential scanning calorimetry. *Energy* 2025;316 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134651>).

Wkład Habilitanta obejmował prace koncepcyjne, opracowanie planu badań analitycznych. Ponadto, Pan dr inż. Szymon Sobek był odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptu do druku oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów. Habilitant był pomysłodawcą koncepcji w ramach, której przeprowadzono serię pomiarów upłynniania próbek odpadów z łopat turbin wiatrowych na włóknie szklanym, w roztworze perhydrolu z wykorzystaniem DSC.

W szczególności koncepcja ta obejmowała wykorzystanie programu specjalistycznego, w celu uzyskania wysokiej jakości danych kinetycznych, obrazujących rozdzielony termiczny rozpad perhydrolu oraz kinetykę rozkładu kompozytu.

- **[A2]** Sobek S, Lombardi L, Mendecka B, Mumtaz H, Sajdak M, Muzyka R, Werle S. A life cycle assessment of the laboratory — scale oxidative liquefaction as the chemical recycling method of the end-of-life wind turbine blades. *J Environ Manage* 2025;361. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121241>).

Wkład Habilitanta obejmował całość przeprowadzonych obliczeń, związanych z zastosowaniem metodyki LCA do oceny oddziaływania na środowisko metody przetwarzania odpadów z łopat turbin wiatrowych, opracowanej na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Autor pracy na podstawie uzyskanych wyników, opracował model oceny cyklu życia analizowanej metody recyklingu chemicznego wraz z wykazaniem głównych korzyści środowiskowych, które obejmowały zidentyfikowanie stresów środowiskowych (environmental hotspots) oraz wyeliminowanie emisji dwutlenku węgla związanego z konwencjonalnym przetwarzaniem łopat, jako odpadów. Habilitant pełnił rolę autora wiodącego i korespondencyjnego, był odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptu do druku, sformułowanie wniosków z badań oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów.

- **[A3]** Sobek S, Zeng K, Werle S, Junga R, Sajdak M. Brewer's spent grain pyrolysis kinetics and evolved gas analysis for the sustainable phenolic compounds and fatty acids recovery potential. *Renew Energy* 2022; 199: 157-68. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.114>).

Habilitant odpowiedzialny był za prace koncepcyjne, związane z określeniem potencjału energetycznego młota odpadowego w warunkach lokalnych, pozyskanie próbek biomasy do badań, zaplanowanie metodyki pomiarów analitycznych z wykorzystaniem analizy termogravimetrycznej (ang. thermogravimetric analysis, TGA) oraz całość obliczeń kinetycznych. Pan dr inż. Szymon Sobek był również odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptu do druku, sformułowanie wniosków końcowych, odpowiedzi na uwagi recenzentów oraz pełnił rolę autora wiodącego i korespondencyjnego.

- **[A4]** Mlonka-Mędrala A, Sobek S, Mariusz W, Werle S, Ionescu G, Marculescu C, Magdziarz A. Energy and material recovery from bone waste: Steam gasification for biochar and syngas production in a circular economy framework. *Energy* 2025;325. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136179>).

W ramach niniejszej pracy Habilitant był odpowiedzialny za opracowanie metodyki pomiarów analitycznych próbek pirolizy (biomasy odpadowej oraz karbonizatów z odpadów z kości indyczych), co umożliwiło analizę wpływu domieszek na kinetykę procesu. Pan dr inż. Szymon Sobek był odpowiedzialny za przeprowadzenie obliczeń kinetycznych, uczestniczył w redagowaniu części manuskryptu, która dotyczyła kinetyki i metodyki obliczeń kinetycznych oraz sformułowania wniosków końcowych. Ponadto, Habilitant był odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów, w zakresie analizy kinetycznej.

- **[A5]** Mlonka-Mędrala A, Sobek S, Mariusz W, Werle S, Patragcu M., Ionescu G, Marculescu C, Magdziarz A. Kinetics study and Py-GC-MS analysis of pyrolysis in chicken bone waste for sustainable utilisation in thermal conversion. *J Environ Manage* 2025;373. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123515>).

Wkład Habilitanta (jako drugiego autora) obejmował opracowanie metodyki pomiarów analitycznych pirolizy próbek biomasy odpadowej oraz wykonanie obliczeń kinetycznych, uwzględniających komplementarne wykorzystanie metod konwersji. W tym zakresie, Habilitant wykonał obliczenia kinetyczne, które prowadziły do określenia energii aktywacji zależnej od stopnia przereagowania oraz modeli kinetycznych pirolizy analizowanych próbek. W pracy tej zaprezentowano nowatorską metodykę i wskazano na korzyści wynikające z równoczesnego stosowania metod izokonwersji i dekonwolucji na potrzeby modelowania procesów przetwarzania biomasy odpadowej. Pan dr inż. Szymon Sobek uczestniczył w redagowaniu części manuskryptu, która dotyczyła metodyki obliczeń kinetycznych oraz sformułowania wniosków. Ponadto, Habilitant był odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów, w zakresie analizy kinetycznej.

- **[A6]** Mumiaz H, Sobek S, Sajdak M, Muzyka R, Drewniak S, Werle S. Oxidative liquefaction as an alternative method of recycling and the pyrolysis kinetics of wind turbine blades. *Energy* 2023; 278:127950 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127950>).

Wkład Habilitanta odnosił się do opracowania metodyki pomiarów analitycznych procesu, w odniesieniu do odpadów z łopat turbin wiatrowych oraz wykonania kompletnych obliczeń kinetycznych, w celu określenia modelu kinetyki przetwarzania odpadu kompozytowego. Habilitant jako drugi autor był odpowiedzialny za przygotowanie obliczeń kinetycznych oraz części manuskryptu. Ponadto, Pan Szymon Sobek był odpowiedzialny za sformułowanie wniosków z badań oraz odpowiedzi na recenzję części uwag dotyczących przedstawionej analizy kinetycznej.

- **[A7]** Sobek S, Tran KQ, Junga R, Werle S. Hydrothermal carbonization of the waste straw: A study of the biomass transient heating behavior and solid products combustion kinetics. *Fuel* 2022;314:122725 (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122725>).

Wkład Habilitanta obejmował przygotowanie metodyki oraz wykonanie eksperymentów

hydrotermalnej karbonizacji (ang. hydrothermal carbonization, HTC) słomy odpadowej (w celu wytworzenia próbek materiału węglowego) oraz zbadanie kinetyki jego spalania na podstawie pomiarów TGA. Habilitant pełnił rolę autora wiodącego i korespondencyjnego oraz był odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptu, formułowanie wniosków z badań oraz prowadzenie procesu recenzji wraz z odpowiedziami na uwagi recenzentów.

- **[A8]** Junga R, Sobek S, Mizerna K, Wzorek M, Moskal-Zaucha H, Wróbel-Iwaniec I. Evaluation of the reactivity of co-combustion of wheat straw and waste rubber thermolysis char. *Renew Energy* 2024;237:121570 (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121570>).

Rola Habilitanta w tej pracy związana była z wykonaniem obliczeń oraz dyskusją wyników w zakresie kinetycznego procesu współspalania próbek słomy odpadowej z karbonizatem, otrzymanym w procesie termolizy zużytych opon. Habilitant (jako drugi autor) był odpowiedzialny za część manuskryptu, która dotyczyła metodyki obliczeń kinetycznych, sformułowania wniosków z badań oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów (w zakresie przedstawionej analizy kinetycznej).

- **[A9]** Junga R, Sobek S, Sajdak M, Yilmaz E. Co-pyrolysis of animal manure and plastic waste study using TG-FTIR analysis. *J Anal Appl Pyrolysis* 2024;181:13—6. (<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106598>).

Rola Habilitanta w badaniach i opublikowanej pracy, związana była z wykonaniem obliczeń kinetycznych procesu ko-pirolizy mieszanek biomasy odpadowej, tj. pomiotu kurzego oraz odpadów polimerowych (polietylenu o wysokiej gęstości, HDPE). W tym zakresie, Habilitant na podstawie pomiarów TGA sprzężonych z spektroskopią w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) wykonał obliczenia kinetyczne z zastosowaniem metodyki obejmującej izokonwersję (Vyazovkin) oraz dekonwolucję (Fraser-Suzuki). Habilitant (jako drugi autor) był odpowiedzialny za część manuskryptu, która dotyczyła metodyki obliczeń kinetycznych, sformułowania wniosków z badań oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów (w zakresie przedstawionej analizy kinetycznej).

- **[A10]** Dudziak M, Werle S, Marszałek A, Sobek S, Magdziarz A. Comparative assessment of the biomass solar pyrolysis biochars combustion behavior and zinc Zn (II) adsorption. *Energy* 2022;261 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125360>).

Pan dr inż. Szymon Sobek wykonał w ramach tej pracy naukowo-badawczej obliczenia kinetyczne. Habilitant (jako jeden ze współautorów oraz autor korespondencyjny) był odpowiedzialny za przygotowanie części manuskryptu, która odnosiła się do metodyki obliczeń kinetycznych, sformułowania wniosków z badań oraz odpowiedzi na recenzję (części uwag w zakresie analizy kinetycznej).

- **[A11]** Szufa S, Piersa P, Junga R, Błaszczuk A, Modliński N, Sobek S, et al. Numerical modeling of the co-firing process of an in situ steam-torrefied biomass with coal in a 230 MW industrial-scale boiler. *Energy* 2023;263 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125918>).

Habilitant wykonał w ramach tej pracy modelowanie kinetyki spalania próbek toryfikowanej słomy kukurydzianej. Habilitant (jako jeden ze współautorów pracy) odpowiedzialny był za

przygotowanie części manuskryptu, która dotyczyła metodyki obliczeń kinetycznych, sformułowania wniosków z badań oraz odpowiedzi na recenzję uwag dotyczących przedstawionej analizy kinetycznej.

Reasumując, na powyższy zbiór publikacji składają się oryginalne prace badawcze o zasięgu międzynarodowym, z wysokimi wskaźnikami Impact Factor IF, tj. od 6,2 do 11,0. Udział Habilitanta w powstaniu wszystkich publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”, zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami Habilitanta i współautorów, oceniam jako znaczący.

4.1. Ocena zasadności podjętej problematyki badawczej

Jako osiągnięcie naukowe, Pan dr inż. Szymon Sobek przedstawił cykl publikacji powiązanych tematycznie pod tytułem „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”, które według opinii Recenzenta charakteryzują się wysokim poziomem naukowym i zasięgiem aplikacyjnym. Przedstawione prace (cykl publikacji jako osiągnięcie naukowe) obrazują istotny wkład Habilitanta w rozwój dziedziny nauk inżynierjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

W mojej ocenie, podjętą problematykę badawczą należy uznać za aktualną zarówno w wymiarze naukowym, jak i aplikacyjnym. Jak słusznie podkreśla Habilitant w opisie przedstawionego do oceny osiągnięcia naukowego, zmieniające się akty prawne oraz wyzwania związane z transformacją energetyczną wpływają na konieczność opracowania efektywnych metod zagospodarowania biomasy i rosnących strumieni odpadów rolniczych i przemysłowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje podejście Habilitanta, które uwzględnia kompleksowość zaproponowanych rozwiązań, w zakresie badań eksperymentalnych, modelowania kinetycznego procesów termochemicznych oraz oceny ich oddziaływania środowiskowego z wykorzystaniem metody LCA.

Za szczególnie wartościowe i nowatorskie należy uznać podejście Habilitanta, które obejmuje połączenie oceny technicznej/technologicznej, obliczeń kinetycznych z analizą środowiskową. Tym samym, Habilitant podjął się nie tylko oceny technologicznej analizowanych procesów, ale również ocenił w jakim stopniu zaproponowane rozwiązania mogą realnie doprowadzić do ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko.

W konsekwencji pomimo, iż przedstawiony cykl publikacji naukowych dotyczy różnych substratów, to stanowi spójny i logicznie powiązany zakres rozwiązań i analiz o wysokiej wartości naukowej.

W opinii Recenzenta należy stwierdzić, że wyniki prac badawczych wykazane w osiągnięciu naukowym, będącym podstawą do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, doskonale wpisują się w zidentyfikowaną lukę badawczą oraz zagadnienia inżynierii środowiska i gospodarki cyrkularnej, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów środowiskowych.

4.2. Omówienie i opinia o przedstawionym osiągnięciu naukowym

Głównym celem naukowym przedstawionego cyklu 11 publikacji było opracowanie komplementarnej metodyki badawczej, umożliwiającej kompleksową ocenę procesów termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od fundamentalnych aspektów kinetyki reakcji z uwzględnieniem charakterystyki produktów procesowych, aż po ocenę środowiskową. Habilitant w badaniach objętych osiągnięciem naukowym zastosował zaawansowane modelowanie kinetyczne procesów termochemicznej konwersji biomasy i odpadów z wykorzystaniem metod izokonwersji (Friedman, Vyazovkin) oraz dekonwolucji (Fraser-Suzuki). Zastosowane metody modelowania umożliwiły precyzyjne odzwierciedlenie mechanizmów wieloetapowych, poszczególnych procesów rozkładu analizowanych typów biomasy i odpadów. W opinii Recenzenta zastosowane podejście było właściwe, biorąc pod uwagę heterogeniczną strukturę analizowanych substratów.

Oryginalność zastosowanego podejścia badawczego, wynika również z integracji modelowania kinetycznego z zastosowaniem zaawansowanych technik analitycznych (m.in. TGA, DSC, TGA-FTIR, Py-GC-MS) oraz oceną oddziaływania na środowisko, opracowywanych metod przetwarzania. Zastosowana metodyka LCA umożliwiła identyfikację kluczowych punktów i oddziaływań środowiskowych. W opinii Recenzenta zakładany przez Habilitanta cel naukowy i poznawczy został w pełni zrealizowany.

Ocena poszczególnych osiągnięć, w ramach jednotematycznego cyklu publikacji pod wspólnym tytułem „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów – od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)”:

- [A1] Sobek S, Mumtaz H, Sajdak M, Schmölzer S, Muzyka R, Werle S. Kinetic study of the decommissioned wind turbine blade oxidative liquefaction based on differential scanning calorimetry. *Energy* 2025;316 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134651>). IF na dzień publikacji 9.4. Punkty ministerialne: 200.

Autorzy podjęli badania zmierzające do poznania i opracowania mechanizmów procesu upłynniania zużytych łopat turbin wiatrowych oraz opracowania modelu kinetycznego, opisującego degradację matrycy epoksydowej. Uzyskane wyniki dostarczyły podstaw do optymalizacji i skalowania procesu chemicznego recyklingu tego rodzaju odpadów kompozytowych. Autorzy zastosowali oryginalne podejście do zidentyfikowanego problemu badawczego, które obejmowało zastosowanie eksperymentalnych profili DSC do kompleksowego rozpoznania kinetyki oksydacyjnego upłynniania zużytych łopat turbin wiatrowych, łącząc tym samym analizę konwersyjną z identyfikacją modeli reakcji i modelowaniem kinetycznym procesu. Szczególnie istotnym efektem poznawczym przeprowadzonych prac badawczych było wykazanie, że degradacja podczas oksydacyjnego upłynniania ma charakter autokatalityczny i przebiega w dwóch kolejnych etapach. W związku z czym, autorzy zaproponowali dwustopniową ścieżkę mechanizmu reakcji, opartą na reakcjach rodnikowych, inicjowanych rozkładem nadtlenu wodoru.

- [A2] Sobek S, Lombardi L, Mendecka B, Mumtaz H, Sajdak M, Muzyka R, Werle S. A life cycle assessment of the laboratory — scale oxidative liquefaction as the chemical recycling method

of the end-of-life wind turbine blades. *J Environ Manage* 2025;361. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121241>). IF na dzień publikacji 8.4. Punkty ministerialne: 200.

Autorzy podjęli się oceny środowiskowej LCA procesu upłynniania zużytych łopat turbin wiatrowych, jako metody recyklingu chemicznego, umożliwiającej odzysk włókien szklanych oraz związków chemicznych powstających w wyniku utleniania. W opinii Recenzenta, za najważniejsze osiągnięcie naukowe przeprowadzonych prac badawczych, należy uznać identyfikację kluczowych czynników determinujących efektywność środowiskową upłynniania zużytych łopat turbin wiatrowych, jako metody recyklingu chemicznego. Istotnym rezultatem była również analiza zużycia nadtlenu wodoru, jako głównego „hotspotu” środowiskowego procesu, a przeprowadzona analiza wykazała silny wpływ tego czynnika na końcowe wyniki LCA. Autorzy słusznie wskazują, iż ograniczenie obciążenia związanego z utleniaczem może prowadzić do uzyskania korzyści środowiskowych względem innych metod zagospodarowania tego typu odpadów. Praca ta jest bardzo wartościowa, gdyż wskazuje na potencjalne kierunki dalszej optymalizacji środowiskowej procesu chemicznego płynnienia zużytych łopat turbin wiatrowych.

- **[A3]** Sobek S, Zeng K, Werle S, Junga R, Sajdak M. Brewer's spent grain pyrolysis kinetics and evolved gas analysis for the sustainable phenolic compounds and fatty acids recovery potential. *Renew Energy* 2022; 199: 157-68. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.114>). IF na dzień publikacji 11.0. Punkty ministerialne: 140.

Autorzy pracy podjęli się ambitnego zadania, które polegało na opracowaniu i zweryfikowaniu wieloetapowego modelu kinetycznego pirolizy młota browarnianego (BSG – brewer's spent grain), który pozwalałby opisać złożony i nakładający się przebieg jego rozkładu termicznego. Przeprowadzono analizę produktów pirolizy z wykorzystaniem TGA, GC-MS i FTIR, co miało na celu precyzyjne określenie składu uwalnianych produktów, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości odzysku związków fenolowych i kwasów tłuszczowych. Autorzy pracy słusznie wskazali, iż złożonego procesu pirolizy BSG nie powinno się opisywać pojedynczymi zależnościami, a dzięki zastosowanym zintegrowanym metodom analizy rozdzielili proces na trzy etapy, odpowiadające rozkładowi: hemicelulozy, celulozy oraz ligniny. W opinii Recenzenta, wartość naukową stanowi integracja zastosowanych metod, a następnie eksperymentalna walidacja zdolności predykcyjnej opracowanego podejścia.

- **[A4]** Mlonka-Mędrala A, Sobek S, Mariusz W, Werle S, Ionescu G, Marculescu C, Magdziarz A. Energy and material recovery from bone waste: Steam gasification for biochar and syngas production in a circular economy framework. *Energy* 2025;325. IF na dzień publikacji 9.4. Punkty ministerialne: 200.

Autorzy wykazali oryginalne podejście, w odniesieniu do zagospodarowania analizowanego typu odpadów, które uwzględniało opracowanie innowacyjnej koncepcji waloryzacji odpadowych kości indyczych, poprzez zgazowanie, prowadzące jednocześnie do wytworzenia syngazu oraz biowęgla. W pracy tej, podjęto się również oceny właściwości otrzymanych biowęgla, pod kątem zastosowania jako materiału katalitycznego w pirolizie biomasy lignocelulozowej. W opinii Recenzenta, największe osiągnięcie wynikające z tej pracy dotyczy

weryfikacji możliwości wykorzystania materiału węglowego, otrzymanego z odpadowych kości indyczych, jako katalizatora pirolizy biomasy lignocelulozowej. Wartościowy rezultat stanowi również opracowanie koncepcji dwutorowej waloryzacji odpadowych kości, tzn. w kierunku jednoczesnego odzysku energii i materiałów o praktycznym zastosowaniu.

- **[A5]** Mlonka-Mędrala A, Sobek S, Mariusz W, Werle S, Patragcu M., Ionescu G, Marculescu C, Magdziarz A. Kinetics study and Py-GC-MS analysis of pyrolysis in chicken bone waste for sustainable utilisation in thermal conversion. *J Environ Manage* 2025;373. IF na dzień publikacji 8.4, Punkty ministerialne: 200.

Autorzy podjęli się badań, które miały na celu określenie charakterystyki i kinetyki procesu pirolizy odpadowych kości indyczych oraz ocenę wpływu sposobu ich wcześniejszej obróbki termicznej na reaktywność, przebieg poszczególnych etapów rozkładu i skład produktów, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji ich termochemicznej waloryzacji. Autorzy zastosowali metodę Friedmana oraz dekonwolucję Fraser–Suzuki, co pozwoliło rozdzielić silnie nakładające się procesy rozkładu i wyodrębnić poszczególne etapy pirolizy. W rezultacie wyznaczono parametry poszczególnych etapów procesu, których nie można było jednoznacznie wyznaczyć bezpośrednio z profilu. Autorzy opisali również ilościowo kinetykę pirolizy i zweryfikowali zdolności predykcyjne uzyskanego modelu. Należy podkreślić, że uzyskane parametry zastosowano następnie do modelowania szybkości konwersji, osiągając bardzo dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych.

- **[A6]** Mumiaz H, Sobek S, Sajdak M, Muzyka R, Drewniak S, Werle S. Oxidative liquefaction as an alternative method of recycling and the pyrolysis kinetics of wind turbine blades. *Energy* 2023; 278:127950 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127950>). IF na dzień publikacji 9.0. Punkty ministerialne: 200.

Autorzy przeanalizowali procesy zagospodarowania zużytych łopat turbin wiatrowych, poprzez opracowanie modelu kinetycznego ich pirolizy oraz ocenę i optymalizację procesu upłynniania. Proces ten w przyjętych założeniach był nakierowany na odzysk włókien szklanych i wartościowych produktów chemicznych z założeniem znaczącego ograniczenia energochłonności. Autorzy badań słusznie wskazali na możliwość jednoczesnej degradacji składników, odzysku włókien szklanych oraz przekształcenia żywicy w użyteczne produkty chemiczne, tj. lotne kwasy tłuszczowe (LKT). Autorzy trafnie wskazują element nowości wynikający z przeprowadzonych badań, który dotyczy jednoczesnego odzysku włókien i lotnych kwasów tłuszczowych z analizowanego procesu i typu odpadów.

- **[A7]** Sobek S, Tran KQ, Junga R, Werle S. Hydrothermal carbonization of the waste straw: A study of the biomass transient heating behavior and solid products combustion kinetics. *Fuel* 2022;314:122725 (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122725>). IF na dzień publikacji 6.7. Punkty ministerialne: 200.

Autorzy przeanalizowali wpływ temperatury i czasu karbonizacji hydrotermalnej (odpadowej) słomy na przebieg procesu, właściwości paliwowe otrzymanych materiałów węglowych oraz ich charakterystykę. W dalszej kolejności, podjęto się opisu kinetyki procesu termicznego wraz z opracowaniem wieloetapowego modelu kinetycznego. Jako wartościowe z naukowego i

aplikacyjnego punktu widzenia, są rezultaty związane z ilościowym wydzielaniem ciepła podczas procesu karbonizacji, gdyż jak wskazują autorzy wcześniejsze publikacje nie uwzględniały zachowania się tego typu surowca podczas etapu nagrzewania HTC.

- **[A8]** Junga R, Sobek S, Mizerna K, Wzorek M, Moskal-Zaucha H, Wróbel-Iwaniec I. Evaluation of the reactivity of co-combustion of wheat straw and waste rubber thermolysis char. *Renew Energy* 2024;237:121570 (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121570>). IF na dzień publikacji 9,5. Punkty ministerialne: 140.

Autorzy podjęli się wielowymiarowej analizy, która obejmowała ocenę możliwości zagospodarowania karbonizatu z termolizy zużytych opon, jako wysokokalorycznego komponentu paliwa biomasowego, poprzez określenie wpływu jego udziału oraz rodzaju lepszczą na właściwości paliwa. Analizom poddano również reaktywność, kinetykę i przebieg procesu współspalania ze słomą. W opinii Recenzenta, najważniejszym osiągnięciem poznawczym tej pracy było wyznaczenie granicznego i aplikacyjnie uzasadnionego udziału karbonizatu z termolizy zużytych opon, w mieszance ze słomą pszeną. Za wartościowe osiągnięcie aplikacyjne można również uznać wykazanie, że tlenek wapnia jest korzystniejszym lepszczem, niż skrobia ziemniaczana pod względem właściwości mechanicznych uzyskiwanych pelletów. Rezultat ten ma istotne znaczenie dla przygotowania rzeczywistego paliwa mieszanego. Należy również podkreślić, że innowacyjność i oryginalność przeprowadzonych badań nie jest bezpośrednio związana z powszechnie znanymi metodami (np. TGA, FTIR), lecz wynika z kompleksowego zbadania relatywnie słabo rozpoznanego układu paliwowego (odpadowa biomasa rolnicza + karbonizat z termolizy zużytych opon) z jednoczesną oceną składu mieszanki, właściwości pelletów oraz opracowaniem kinetyki procesu i produktów spalania.

- **[A9]** Junga R, Sobek S, Sajdak M, Yilmaz E. Co-pyrolysis of animal manure and plastic waste study using TG-FTIR analysis. *J Anal Appl Pyrolysis* 2024;181:13-6. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106598>. IF na dzień publikacji 6.2. Punkty ministerialne: 100.

Autorzy podjęli się analizy mechanizmu i efektów synergii wspólnej pirolizy odchodów zwierzęcych i odpadowego polietylenu. Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu udziału tworzywa na kinetykę procesu, reaktywność mieszaniny i skład powstających produktów gazowych, w kontekście możliwości wspólnej termochemicznej waloryzacji obu wymienionych powyżej strumieni odpadów. W opinii Recenzenta główne osiągnięcie naukowe z przeprowadzonych badań, dotyczy ilościowego opisu synergii, podczas wspólnej pirolizy odchodów zwierzęcych z odpadowym polietylenem, a następnie wyjaśnienie jej przebiegu na poziomie kinetyki procesu. Autorzy wykazali, iż dodatek odpadowego polietylenu istotnie zmienia kinetykę rozkładu odchodów zwierzęcych, a dodanie 20% tego odpadu znacząco obniżyło energię aktywacji głównego etapu pirolizy, z jednoczesnym przesunięciem maksimum uwalniania produktów, w kierunku niższych temperatur.

- **[A10]** Dudziak M, Werle S, Marszałek A, Sobek S, Magdziarz A. Comparative assessment of the biomass solar pyrolysis biochars combustion behavior and zinc Zn (II) adsorption. *Energy*

2022;261 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125360>). IF na dzień publikacji 9.0 Punkty ministerialne: 200.

Habilitant wraz z pozostałymi członkami zespołu zrealizowali badania, mające na celu ocenę możliwości wykorzystania biowęgla otrzymanych w procesie pirolizy słomy odpadowej i osadów ściekowych, jako alternatywnych paliw stałych oraz adsorbentów jonów Zn(II), wraz z określeniem wpływu pirolizy solarnej na właściwości spalania i kinetykę procesu. W opinii Recenzenta warto podkreślić, iż zakres prac badawczych dotyczył zarówno aspektów energetycznych, jak i środowiskowych. Otrzymane wyniki są wartościowe pod względem naukowym i aplikacyjnym. Przykładowo, ustalono, iż biowęgiel ze słomy odpadowej posiadał korzystne właściwości paliwowe, produkt z osadów ściekowych charakteryzował się wyższą zdolnością adsorpcji jonów Zn(II).

- [A11] Szufa S, Piersa P, Junga R, Błaszczuk A, Modliński N, Sobek S, et al. Numerical modeling of the co-firing process of an in situ steam-torrefied biomass with coal in a 230 MW industrial-scale boiler. *Energy* 2023;263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125918>. IF na dzień publikacji 9.0 Punkty ministerialne: 200.

Autorzy podjęli się oceny możliwości zastąpienia części węgla, toryfikowaną słomą kukurydzianą w kotle przemysłowym OP-230 oraz określeniem wpływu udziału biomasy na przebieg współspalania, warunki cieplne i emisje, z wykorzystaniem badań kinetycznych i modelowania CFD. Należy podkreślić, że autorzy przeanalizowali relatywnie słabo opisywany w literaturze układ paliwowy, tj. węgiel i słomę kukurydzianą po toryfikacji parą wodną. Jako nowość w opinii Recenzenta, należy wskazać oryginalny model kinetyczny konkretnej biomasy oraz jego implementację w analizowanych warunkach procesowych.

4.3. Znaczenie naukowe i technologiczne rezultatów w ramach osiągnięcia naukowego

Przedstawiony do oceny jednotematyczny cykl publikacji, wyróżnia się spójnością oraz posiada elementy łączące wszystkie publikacje. W opinii Recenzenta, należy wyróżnić następujące rezultaty i osiągnięcia, które mają znaczący wpływ na rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, energetyka i górnictwo:

- znaczący rozwój modeli kinetycznych procesów (pirolizy, zgazowania oraz oksydacyjnego upłynniania) z zastosowaniem do odpadów o złożonym składzie chemicznym i strukturalnym
- opracowanie podstaw naukowych chemicznego recyklingu zużytych łopat turbin wiatrowych, poprzez rozpoznanie dwuetapowego autokatalitycznego mechanizmu oksydacyjnego upłynniania oraz opracowanie modelu kinetycznego, umożliwiającego modelowanie, optymalizację i skalowanie analizowanego procesu,
- wyznaczenie kluczowych uwarunkowań środowiskowych i efektywności oksydacyjnego upłynniania odpadowych łopat turbin wiatrowych oraz wskazanie kierunku dalszego rozwoju tej technologii, który w przyszłości ma realną szansę na zwiększenie odzysku włókien

szklanych i wartościowych produktów chemicznych,

- rozwój metodyki modelowania kinetycznego pirolizy biomasy odpadowej, wspierającej rozwój jej termochemicznej konwersji i odzysk wartościowych produktów,
- kompleksowe wykazanie możliwości zastosowania biowęgla z substratów odpadowych, jako materiału katalitycznego oraz udowodnienie możliwości kaskadowej waloryzacji odpadowych ilości indykich w procesie zgazowania,
- rozszerzenie dostępnej wiedzy, w zakresie projektowania energetycznej waloryzacji odpadowej biomasy metodą HTC, poprzez określenie efektów cieplnych procesu oraz zależności między warunkami karbonizacji, a właściwościami i kinetyką termicznego przetwarzania otrzymanych produktów,
- rozszerzenie dostępnej wiedzy w zakresie wspólnej termicznej/termiczno-chemicznej waloryzacji odpadów organicznych i tworzyw sztucznych oraz opracowanie podstaw do projektowania procesów przetwarzania - problematycznych strumieni odpadowych, w tym odchodów zwierzęcych i odpadowych tworzyw sztucznych oraz
- opracowanie metod modelowania w zakresie współspalania biomasy i paliw kopalnych, poprzez integrację kinetyki paliwa z symulacją CFD dla rzeczywistego kotła energetycznego.

W opinii Recenzenta, przedstawiony do oceny cykl publikacji A1–A11 odpowiada na istotne wyzwania gospodarcze, związane z transformacją energetyczną, zagospodarowaniem rosnących strumieni odpadów oraz wdrażaniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Zasadność podjętych badań została przez Habilitanta w odpowiednim stopniu uzasadniona, co w szczególności wynika z szerokiego zakresu analizowanych surowców. Istotnym elementem osiągnięcia, jest również analiza procesów współ-przetwarzania, umożliwiającą identyfikację efektów synergicznych i optymalizację parametrów procesowych. Należy również podkreślić, iż zakres analizowanych przez Habilitanta substratów nie był przypadkowy, gdyż dotyczył problematycznych odpadów, których recykling i efektywne zagospodarowanie stanowi aktualne wyzwanie o charakterze badawczym oraz technologicznym. Wykazane rezultaty Habilitanta mogą zostać praktycznie wykorzystane, podczas projektowania instalacji do termiczno-chemicznego przetwarzania biomasy i substratów odpadowych.

5. Pozostały dorobek naukowy, działalność dydaktyczna i popularyzatorska

Poza zakresem tematycznym badań objętych przedstawionym do oceny osiągnięciem naukowym (cykl publikacji A1–A11), Habilitant wykazuje znaczącą i różnicowaną aktywność naukową, która dotyczy hydrotermalnego przetwarzania biomasy, wytwarzania wartościowych produktów rynkowych z biomasy, recyklingu chemicznego zróżnicowanych odpadów. Dorobek ten w opinii Recenzenta uzupełnia osiągnięcie habilitacyjne i wskazuje na wyróżniającą się samodzielność naukową, umiędzynarodowienie działalności badawczej oraz zdolność do

rozwijania nowych kierunków badań i organizowania współpracy naukowo-badawczej.

Na szczególne podkreślenie zasługują zagraniczne staże naukowe, udział w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych, m.in. OPUS-21 „Oksydatywne upłynnianie odpadowych tworzyw sztucznych. Badania eksperymentalne wraz z wielowymiarową analizą danych z wykorzystaniem metod chemometrycznych” (Narodowe Centrum Nauki). Znaczącym osiągnięciem jest również pełnienie przez Habilitanta roli kierownika, w ramach pojedynczego działania naukowego, w projekcie MINIATURA-6 „Środowiskowa ocena cyklu życia zastosowania procesów hydrotermalnych i solwolizy jako metod recyklingu chemicznego i materiałowego odpadów z tworzyw sztucznych”.

Habilitant był promotorem znaczącej ilości prac magisterskich, a obecnie pełni funkcję promotora pomocniczego dwóch prac doktorskich, które dotyczą hydrotermalnego przetwarzania odpadów oraz oceny cyklu życia metod recyklingu chemicznego odpadów. Pan dr inż. Szymon Sobek pełnił również rolę recenzenta w projektach inżynierskich i pracach magisterskich. Wykazano tym samym wielokierunkową działalność Habilitanta w pracy naukowo-badawczej.

Habilitant prowadzi zajęcia z zakresu energetyki i różnych aspektów inżynierii środowiska, m.in. odnawialnych źródeł energii oraz oceny cyklu życia (LCA). Ważnym elementem działalności dydaktycznej był udział w projektach, w ramach których współtworzył kursy dotyczące LCA oraz brał udział w przeszkoleniu ponad 150 studentów i przygotowaniu platformy edukacyjnej.

6. Konkluzja końcowa

Przedstawiony cykl publikacji A1-A11 oceniam jako spójne osiągnięcie naukowe, którego wspólną cechą jest zbadanie procesów przetwarzania biomasy i odpadów, ze szczególnym uwzględnieniem kinetyki i mechanizmów zachodzących przemian oraz aspektów środowiskowych. Uzupelnienie badań laboratoryjnych o ocenę środowiskową LCA jest niezwykle wartościowe i dodatkowo rozszerza zakres osiągnięcia o ocenę zasadności środowiskowej, w odniesieniu do analizowanych procesów zagospodarowania biomasy i odpadów. Obszar pozyskanej nowej wiedzy przez Habilitanta przede wszystkim dotyczy procesów termochemicznego przetwarzania biomasy i odpadów oraz integracji i rozwoju metod umożliwiających modelowanie tych procesów.

W opinii Recenzenta należy stwierdzić, że wyniki prac badawczych wykazane w osiągnięciu naukowym, będącym podstawą do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, doskonale wpisują się w zagadnienia inżynierii środowiska i energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów środowiskowych. W mojej ocenie, uzyskane przez Habilitanta wyniki badań w ramach przedstawionego do oceny osiągnięcia charakteryzują się innowacyjnością w sferze znacząco wykraczającej poza skalę kraju oraz stanowią znaczący wkład w dotychczasowy stan wiedzy, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Kierując się pozytywną oceną osiągnięcia naukowego (cykl publikacji pod wspólnym tytułem „Komplementarne podejście do badań termicznego przetwarzania biomasy i odpadów

– od kinetyki reakcji do ocenę cyklu życia (LCA)” oraz pozostałego dorobku naukowego i przedstawionego doświadczenia zawodowego Habilitanta, w mojej ocenie Pan dr inż. Szymon Sobek spełnia ustawowe wymogi stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego, zgodnie z art. 221 ust. 5 ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2024, poz. 1571 z późniejszymi zmianami).

Wobec powyższego, Wnioskuje o dopuszczenie Pana dr inż. Szymon Sobek do dalszych etapów, zmierzających do nadania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.