

Warszawa, dnia 13 sierpnia 2026 r.

dr hab. inż. Piotr Boruszewski, prof. SGGW  
Katedra Technologii i Przedsiębiorczości  
w Przemśle Drzewnym  
Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej

**mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego**

pt. „Sustainable conversion of strategic industrial wastes and biomass into activated carbons  
for CO<sub>2</sub> capture: mechanisms, material design, and adsorption performance”,

rozprawa realizowana w:

Department of Environmental and Energy Sciences

Energy Technology Division

Chalmers University of Technology

Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza

Wydział Inżynierii Środowiska

Politechnika Wrocławska

Promotorzy:

prof. Pavleta Knutsson (Chalmers University of Technology)

prof. Klas Andersson (Chalmers University of Technology)

prof. Renata Krzyżyńska (Politechnika Wrocławska)

### 1. Podstawa oceny

Ocenę rozprawy doktorskiej wykonano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej nr 451/22/RDND08/2024-2028 z dnia 17 czerwca 2026 r., która to powołała mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie Panu mgr. inż. Bartoszowi Dziejarskiemu stopnia

naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

## **2. Sylwetka Doktoranta**

Na podstawie przedłożonej dokumentacji oraz załączonego w dysertacji wykazu publikacji, stwierdzić należy, że Pan mgr inż. Bartosz Dziejarski odznacza się istotną aktywnością i dorobkiem naukowym, zwłaszcza na tym etapie kariery akademickiej. Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje 24 publikacje w tym 4 główne artykuły wchodzące w skład cyklu monotematycznego, opublikowane w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym (tj. *Chemical Engineering Journal*, *Environmental Research*, *ACS Omega*, *Materials & Design*). W każdym z tych artykułów Doktorant jest pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym, co bezsprzecznie dowodzi Jego wiodącej roli w konceptualizacji, realizacji badań oraz formułowaniu wniosków. Ponadto wykaz dorobku obejmuje 11 dodatkowych, powiązanych tematycznie publikacji, opublikowanych w recenzowanych czasopismach z listy JCR (m.in. *Materials Today Sustainability*, *Fuel*, *Carbon*, *Journal of Cleaner Production*). Wskaźniki naukometryczne zgromadzonego dorobku są wysokie, co świadczy o doskonałym rozeznaniu Doktoranta w aktualnych trendach dla reprezentowanej dyscypliny naukowej. Na dzień 13 sierpnia 2026 r. liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science wynosi 1710, w tym 1654 bez autocytowań, a indeks Hirscha 18 (według bazy Scopus dorobek publikacyjny obejmuje 25 pozycji, liczba cytowań wynosi 2135, a indeks Hirscha 20).

## **3. Przedmiot oceny**

Przedmiot oceny stanowi rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego pt.: „Sustainable conversion of strategic industrial wastes and biomass into activated carbons for CO<sub>2</sub> capture: mechanisms, material design, and adsorption performance”. Praca została napisana w języku angielskim i ma formę spójnego cyklu czterech publikacji naukowych (tzw. zbioru prac). Dysertacja obejmuje kolejno: streszczenie, wykaz skrótów, cel i zakres pracy, obszerne tło teoretyczne (rozdziały 1-3), szczegółowy opis stosowanych materiałów i metod badawczych (rozdział 4), omówienie i dyskusję wyników z poszczególnych publikacji (rozdział 5) oraz syntetyczne wnioski i perspektywy na przyszłość (rozdziały 6-7). Pracę wieńczy wykaz cytowanej literatury obejmujący 91 pozycji oraz załączone kopie opublikowanych artykułów naukowych (prace I-IV).

#### **4. Ocena ogólna**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego dotyczy syntezy funkcjonalnych węgla aktywnych (ACs) z różnorodnych strumieni odpadowych z przeznaczeniem do wychwytu dwutlenku węgla. Tematyka podjętych badań jest niezwykle istotna i w pełni aktualna, biorąc pod uwagę rosnące globalne stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze oraz nieodzowność wdrażania technologii CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage). Równolegle, wpisuje się ona w postulaty gospodarki o obiegu zamkniętym (circular economy), zagospodarowując wysokowęglowe odpady, takie jak biomasa drzewna, odzyskana sadza z pirolizy opon (rCB) oraz grafit z recyklingu baterii litowo-jonowych (LiBs). Tradycyjne węgle aktywne bazują na zasobach kopalnych, zatem poszukiwanie zrównoważonych i wydajnych alternatyw stanowi kluczowe wyzwanie materiałowe.

Wybór przez Doktoranta tematu rozprawy uważam za wysoce trafny i w pełni zasadny. Zastosowanie trzech skrajnie zróżnicowanych strukturalnie prekursorów w połączeniu z systematycznym studium mechanizmów aktywacji związkami potasu, pozwoliło Autorowi na sformułowanie uniwersalnych i bardzo cennych wytycznych projektowych (design guidelines). Praca posiada zarówno wyraźnie zarysowany cel poznawczy (mechanizmy aktywacji i zmian porowatości), jak i aplikacyjny (skalowalne metody konwersji odpadów w sorbenty).

#### **5. Ocena szczegółowa**

Wstęp i tło teoretyczne (rozdziały 1-3) zajmują 20 stron. Doktorant w sposób wyczerpujący i logiczny charakteryzuje problematykę antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, uzasadniając potrzebę rozwoju sorbentów stałych. Następnie płynnie przechodzi do omówienia specyfiki poszczególnych prekursorów odpadowych (biomasa, ELTs, LiBs) oraz teorii procesów aktywacji fizycznej i chemicznej. Rozdział ten został przygotowany bardzo poprawnie, z bogatym i trafnym doбором najnowszej literatury przedmiotu.

Rozdział 4. obejmuje na 17 stronach szczegółowy opis materiałów i metodyki badawczej. Autor posłużył się zaawansowanym warsztatem analitycznym, obejmującym m.in.: analizę elementarną, pomiary adsorpcji N<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> oraz analizy rozkładu wielkości porów przy użyciu metody DFT, spektroskopię FT-IR i Ramana, dyfraktometrię XRD, mikroskopię SEM-EDS oraz spektroskopię XPS. Parametry procesów aktywacji (temperatura, proporcje aktywatora, czas) zostały dobrane w sposób systematyczny. Na uwagę zasługuje dobrze udokumentowany proces przygotowania (mechanicznego i chemicznego) samych prekursorów przed właściwą aktywacją.

W najważniejszym 5. rozdziale dysertacji obejmującym 18 stron tekstu, Doktorant szeroko dyskutuje i interpretuje uzyskane w ramach publikacji I-IV wyniki badań. Dokonana przez mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego analiza prowadzi do następujących ustaleń:

- **Wpływ prekursora** – wykazano, że odpowiedź na aktywację potasową nie jest uniwersalna, lecz silnie zdeterminowana strukturą wyjściową. Biomasa drzewna charakteryzuje się doskonałą reaktywnością, co pozwala na generowanie gęstej sieci mikroporów (powierzchnia właściwa z wykorzystaniem modelu BET do 2655 m<sup>2</sup>/g) przy udziale KOH, jednak zbyt wysokiemu udziałowi aktywatora towarzyszyło poszerzanie się porów i prowadziło to do zjawiska przetrawienia struktury węglowej. Odzyskana sadza z pirolizy opon (rCB) tworzy struktury mezoporowate z uwagi na zbitą morfologię i ograniczenia dyfuzyjne, natomiast w przypadku grafitu z LiBs (który stanowił najbardziej odporny strukturalnie prekursor spośród badanych układów), dochodziło głównie do lokalnego powstawania defektów i zaburzenia krawędzi, jednak nie do całkowitego zniszczenia struktury.
- **Mikroporowatość** – w pracy wykazano, że dominującym czynnikiem strukturalnym wpływającym na wydajność wychwytywania CO<sub>2</sub> jest rozkład wielkości porów, a nie całkowita powierzchnia. Ponadto wychwyt CO<sub>2</sub> nie wykazuje liniowej korelacji z całkowitą powierzchnią właściwą materiału. Adsorpcję kontroluje przede wszystkim objętość tzw. ultramikroporów (<0.7 nm), idealnie dopasowanych przestrzennie do kinetycznej średnicy molekuly CO<sub>2</sub>.
- **Wpływ specjacji potasu** – w ramach publikacji I i III Doktorant przedstawił mechanizmy działania użytych soli. Badania wykazały, że wydajność aktywacji nie zależy wyłącznie od zawartości potasu, ale również od jego formy chemicznej. Choć wodorotlenek potasu (KOH) zapewnia najwyższą wydajność rozwijania porów, wiąże się to ze stratami masy. W odniesieniu do biomasy zastąpienie go szczawianem potasu (K<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) stanowi proekologiczną i łagodniejszą alternatywę, promującą powstawanie pożądanых, wąskich mikroporów przy zachowaniu znacząco wyższej wydajności z procesu.
- **Rola chemii powierzchni** – z wykorzystaniem technik XPS i FT-IR udowodniono, że wspólną cechą wszystkich materiałów jest indukowane potasem wprowadzanie grup funkcyjnych zawierających tlen, co wskazuje na wspólny mechanizm aktywacji (publikacje I i II). Grupy funkcyjne zawierające tlen działają zatem jako modyfikatory

wspomagające, a nie dominujące cechy determinujące wydajność. Doktorant słusznie, aczkolwiek ostrożnie wskazuje przy tym, że dla procesów zdominowanych przez adsorpcję fizyczną są to parametry wyłącznie wspierające interakcje gaz-powierzchnia, pozostające wtórnymi wobec struktury porów.

Atutem z perspektywy inżynierskiej jest uwzględnienie w badaniach zjawisk fizykochemicznych, a także ocena stabilności cyklicznej materiałów podczas wielokrotnej adsorpcji. Rozprawa obala powszechne przekonanie o wiodącej roli całkowitej powierzchni właściwej w adsorpcji CO<sub>2</sub>. Wyniki jasno sugerują, że wychwyt CO<sub>2</sub>, jak również selektywność CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, są kontrolowane przez mikropory o rozmiarach dopasowanych do średnicy kinetycznej cząsteczki CO<sub>2</sub>. Praca dostarcza ponadto dogłębnej wiedzy na temat wpływu rodzaju aktywatora (KOH vs. K<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> itp.).

Osiągnięcia Doktoranta stanowią ważny wkład w projektowanie materiałów węglowych do separacji gazów. Autor precyzyjnie udowodnił, że podatność na reakcje aktywacji jest silnie zależna od właściwości wyjściowych prekursora. Biomasa okazała się niezwykle reaktywna wobec KOH, pozwalając na wytworzenie gęstej sieci mikroporów oraz uzyskanie powierzchni właściwej, wyznaczonej na podstawie modelu BET, osiągającej 2655 m<sup>2</sup>/g, choć wiązało się to z dużym ryzykiem przetrwania struktury węglowej, przy nadmiernej intensywności procesu.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego prezentuje wysoki poziom. Rolą recenzenta jest jednak również identyfikacja obszarów wymagających dodatkowych wyjaśnień lub pogłębionej polemiki. Rozprawa zawiera pewne luki poznawcze, które wymagają uszczegółowienia, tj.:

1. **Brak pomiarów pojemności adsorpcyjnej w przypadku węgla uzyskanych z recyklingu baterii litowo – jonowych (publikacja IV)** – chociaż w tym przypadku analiza zmian mikrostrukturalnych grafitu po obróbce KOH została przeprowadzona, w pracy nie zaprezentowano rzeczywistych pomiarów zdolności adsorpcyjnych względem CO<sub>2</sub> dla tych układów (co zresztą sam Autor uczciwie przyznaje w tekście). Oparcie oceny wyłącznie na analizie rozkładu wielkości porów (PSD) daje jedynie predykcyjne wskaźniki potencjału materiału i pozostawia w tym aspekcie pewien niedosyt, zwłaszcza utylitarny.
2. **Oparcie badań na układach statycznych** – parametry sorpcyjne oraz selektywność CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> zostały określone na bazie równowagowych izoterm gazowych

w znormalizowanych warunkach równowagi. Skalowanie tego typu rozwiązań wymusza w przyszłości dodatkową weryfikację. Pominięcie testów dynamicznych i wpływu wilgotności gazu ograniczają na tym etapie możliwość przeniesienia wyników do warunków przemysłowych.

3. **Aspekty technologiczno-ekonomiczne** – mimo odwołań do założeń gospodarki obiegu zamkniętego, praca nie zawiera analizy techno-ekonomicznej (TEA) oraz analizy cyklu życia (LCA). Jednak rzeczywiście wskazano, że na tym etapie badań, analizy tego typu odznaczają się pewnymi ograniczeniami. Wysokoenergetyczne procesy pirolizy połączone z obróbką KOH wymagają precyzyjnego oszacowania bilansu kosztów i śladu węglowego przed wdrożeniem w skali makro.

Pod względem edytorskim praca została przygotowana starannie, czytelnie i estetycznie. Powyższe uwagi mają charakter standardowej dyskusji naukowej i w żadnym stopniu nie umniejszają wiodącej wartości merytorycznej oraz nowatorstwa ocenianej dysertacji.

## 6. Podsumowanie oceny

Rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego stanowi rzetelne rozwiązanie problemu naukowego i dostarcza istotnych wytycznych w zakresie projektowania sorbentów węglowych. Kandydat wykazał się odpowiednim warsztatem badawczym, umiejętnością poprawnego wnioskowania oraz znajomością zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej i inżynierii środowiska. Tematyka badań podjętych przez Pana mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego jest fundamentalnie ważna z punktu widzenia wyzwań klimatycznych. Przedstawione w rozprawie wyniki nowatorskich eksperymentów rzetelnie pogłębiają wiedzę na temat mechanizmów aktywacji chemicznej wysokowęglowych surowców odpadowych. Zdefiniowane cele badawcze zostały zrealizowane, a weryfikacja hipotez oparta została na bezbłędnie zaplanowanej metodyce. Doktorant wykazał się bardzo dobrym warsztatem naukowym, biegłością w obsłudze zaawansowanych urządzeń badawczych oraz wyjątkową dojrzałością w formułowaniu prawidłowych wniosków. Przedstawione w recenzji uwagi w ujęciu ogólnym nie wpływają na wartość merytoryczną jak również końcową, pozytywną ocenę pracy, a stanowią wyłącznie bazę do stymulującej wymiany poglądów.

W podsumowaniu recenzji jednoznacznie stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska w postaci monotematycznego cyklu publikacji, zatytułowana „Sustainable conversion of strategic industrial wastes and biomass into activated carbons for CO<sub>2</sub> capture:

mechanisms, material design, and adsorption performance” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity Dz.U. z 2023 r., poz. 742) i stanowi wymaganą podstawę do nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Składał zatem wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie Pana mgr. inż. Bartosza Dziejarskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Mając na uwadze bardzo wysoki poziom merytoryczny rozprawy, szeroki i kompleksowy zakres przeprowadzonych badań oraz istotny wkład uzyskanych wyników w rozwój wiedzy dotyczącej preparatyki węgla aktywnych przeznaczonych do zastosowania w procesach adsorpcji CO<sub>2</sub>, wnioskuję o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.

Warszawa, dnia 13 sierpnia 2026 r.

dr hab. inż. Piotr Boruszewski, prof. SGGW