

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

Wrocław, 11.06.2026 r.

**RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Gabrieli Gąsior  
pt. „Biodegradowalne materiały na bazie żelaza – wpływ porowatej architektury  
i stabilności warstwy produktów korozji na proces degradacji oraz odpowiedź  
biologiczną”**

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Gabrieli Gąsior pt. *„Biodegradowalne materiały na bazie żelaza – wpływ porowatej architektury i stabilności warstwy produktów korozji na proces degradacji oraz odpowiedź biologiczną”*, przygotowana pod kierunkiem dr hab. Aleksandry Radtke, prof. UMK. Praca powstała w wyniku badań prowadzonych w ramach grantu Preludium BIS Narodowego Centrum Nauki (2019/35/O/ST5/00405) oraz grantu NAWA (PPN/STA/2021/1/00026). Rozprawa została przygotowana w środowisku naukowym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (UMK) w Toruniu, w obszarze badań rozwijanych w Katedrze Chemii Nieorganicznej i Koordynacyjnej Wydziału Chemii UMK. Warto już na wstępie podkreślić rolę Pani Promotor, prof. Aleksandry Radtke, której dorobek i rozpoznawalność naukowa dobrze korespondują z tematyką ocenianej rozprawy. W mojej ocenie wybór takiej Promotorki miał istotne znaczenie dla jakości rozprawy, ponieważ praca mgr inż. Gabrieli Gąsior nosi wyraźne znamiona szkoły badawczej, w której zagadnienia syntezy i charakterystyki materiałów są ściśle powiązane z ich potencjalną funkcjonalnością biologiczną.

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna z punktu widzenia współczesnej chemii materiałów oraz inżynierii biomedycznej. Praca dotyczy porowatych materiałów żelaznych projektowanych jako potencjalne biomateriały biodegradowalne, przy czym jej zasadniczym problemem badawczym nie jest samo otrzymanie kolejnych struktur żelaznych, lecz próba zrozumienia, w jaki sposób architektura porowata, właściwości powierzchniowe oraz stabilność warstwy produktów korozji wpływają na kinetykę degradacji i odpowiedź

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

**biologiczną.** Jest to podejście wartościowe, ponieważ żelazo, mimo korzystnych właściwości mechanicznych i relatywnie dobrej biogodności, pozostaje materiałem trudnym aplikacyjnie ze względu na zbyt wolne, niejednorodne i często trudne do przewidzenia tempo degradacji. Autorka słusznie zauważa, że klasyczne strategie modyfikacji składu chemicznego nie wyczerpują możliwości regulowania tego procesu, a równie ważne mogą być czynniki strukturalne, transportowe i powierzchniowe.

Za najważniejszy element nowości naukowej rozprawy uważam przesunięcie punktu ciężkości z prostego pytania „jaki skład chemiczny przyspiesza degradację żelaza?” na znacznie bardziej złożone pytanie „w jaki sposób architektura porowata, transport masy i warstwa produktów korozji współregulują degradację materiału w czasie?”. Taki sposób myślenia jest dojrzały i dobrze wpisuje się w aktualne tendencje w projektowaniu biomateriałów, gdzie materiał nie jest traktowany jako bierny obiekt o określonym składzie, lecz jako dynamiczny układ oddziałujący ze środowiskiem biologicznym. **Szczególnie istotne jest wykazanie, że porowatość i mikrostruktura mogą determinować ścieżkę degradacji w stopniu porównywalnym, a czasem większym niż sam skład stopowy. Ważnym osiągnięciem jest również pokazanie, że klasyczne parametry elektrochemiczne, takie jak potencjał korozyjny czy gęstość prądu korozyjnego, nie zawsze dobrze opisują rzeczywiste tempo degradacji struktur porowatych i powinny być interpretowane łącznie z wynikami badań immersyjnych, analizą mikrostruktury oraz charakterystyką produktów korozji.** W mojej ocenie nowość rozprawy ma przede wszystkim charakter koncepcyjno-interpretacyjny, ale jest dobrze podparta wynikami eksperymentalnymi.

Na podstawie treści rozprawy można stwierdzić, że część badań została opublikowana w formie oryginalnego artykułu naukowego: G. Gąsior\*, M. Grodzicka, T. Jędrzejewski, M. Wiśniewski, A. Radtke\*, „*Comparative Study of Porous Iron Foams for Biodegradable Implants: Structural Analysis and In Vitro Assessment*”, *Journal of Functional Biomaterials* **2023**, 14, 293 (IF<sub>2024</sub> = 5,2; 100 punktów MNiSW). Ponadto Doktorantka jest współautorką pracy przeglądowej dotyczącej biodegradowalnych materiałów na bazie żelaza: G. Gąsior, J. Szczepański, A. Radtke\*, „*Biodegradable Iron-Based Materials—What Was Done and What*

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

*More Can Be Done?*”, *Materials* **2021**, *14*, 3381 (IF<sub>2024</sub> = 3,2; 140 punktów MNiSW). W bibliografii pojawia się również pozycja dotycząca porowatych rusztowań żelaznych z dodatkiem manganu i miedzi, jednak zapis tej pracy w rozprawie nie pozwalał mi jednoznacznie potwierdzić jej pełnego statusu wydawniczego na podstawie samego tekstu dysertacji. Po przeszukaniu baz danych mogę jedynie założyć, że może chodzić o pracę opublikowaną na łamach *European Cells and Materials* **2025**, *54*, 128-144 (IF<sub>2024</sub> = 3,1; 100 punktów MNiSW) zatytułowaną „*Porous Iron Scaffolds with the Addition of Manganese and Copper-Physicochemical Characteristics and Biocompatibility Analysis*”, gdzie współautorami są M. Grodzicka, G. Gąsior, T. Jędrzejewski, S. Wrotek, P. Madajski i A. Radtke\*. **Tematyka wskazanych publikacji jest spójna z rozprawą, a praca przeglądowa pokazuje, że Doktorantka potrafiła wcześniej uporządkować stan wiedzy w obszarze, który następnie rozwijała eksperymentalnie.**

Część literaturowa rozprawy jest obszerna, dobrze zaplanowana i zasadniczo adekwatna do później omawianych badań własnych; jej uzupełnieniem są również dwa aneksy zamieszczone na końcu dysertacji i dotyczące: historii rozwoju leczenia chorób serca (ANEKS 1) oraz technologii formowania i projektowania polimerowych stentów bioresorbowalnych (ANEKS 2). W części teoretycznej (literaturowej) Autorka prowadzi czytelnika od kontekstu klinicznego, przez trwałe metale stosowane w stentach, ograniczenia polimerowych rusztowań bioresorbowalnych, metale biodegradowalne, właściwości żelaza, metody otrzymywania struktur żelaznych, rolę porowatości, domieszkowanie i modyfikacje powierzchni, aż do autorskich ram interpretacyjnych degradacji porowatych struktur żelaznych. Tak szeroki przegląd literatury jest uzasadniony interdyscyplinarnym charakterem pracy. W niektórych fragmentach, zwłaszcza dotyczących historii leczenia chorób sercowo-naczyniowych i ogólnego tła klinicznego, narracja mogłaby być krótsza i bardziej podporządkowana głównemu problemowi chemiczno-materiałowemu. Nie zmienia to jednak faktu, że **przeegląd literatury jest merytorycznie solidny, aktualny i w większości oparty na publikacjach z uznanych czasopism naukowych oraz renomowanych wydawnictw.** Cytowana literatura obejmuje liczne prace

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

z czasopism funkcjonujących w głównym obiegu nauki, w tym z obszaru biomateriałów, chemii materiałów, korozji, inżynierii powierzchni i nauk biomedycznych.

**Część doświadczalna została zaprojektowana ambitnie** i obejmuje opracowanie oraz optymalizację procesu wytwarzania porowatych rusztowań żelaznych metodą replikacji z wykorzystaniem szablonów poliuretanowych i melaminowych. Następnie Autorka przeprowadziła charakterystykę mikrostrukturalną, analizę porowatości, badania degradacji w warunkach statycznych i dynamicznych, pomiary elektrochemiczne, analizę zmian pH, identyfikację produktów korozji oraz badania biologiczne *in vitro*. **Taki zestaw metod jest dobrze dobrany do postawionej hipotezy i pozwala na wieloaspektową ocenę materiałów.** Szczególnie pozytywnie oceniam fakt, że **Autorka nie ogranicza się do prostego zestawienia wyników, ale próbuje je integrować w spójny model zależności między architekturą materiału, stabilnością warstwy produktów korozji, tempem degradacji i odpowiedzią komórkową.**

**Najmocniejszą częścią rozprawy jest analiza wpływu porowatej architektury na degradację.** Doktorantka przekonująco pokazuje, że różnice między strukturami otrzymanymi na szablonech poliuretanowych i melaminowych nie mają wyłącznie charakteru morfologicznego, lecz prowadzą do odmiennych reżimów kinetycznych degradacji. Istotne są również obserwacje dotyczące warunków przepływowych, które lepiej przybliżają układ do środowiska dynamicznego niż klasyczne testy statyczne. Wyniki wskazują, że struktury bardziej otwarte, cieńsze i bardziej podatne na penetrację środowiska szybciej ulegają degradacji, co ma bezpośrednie znaczenie projektowe. **Bardzo wartościowe jest również wykazanie, że dodatki stopowe, takie jak mangan i miedź, mogą modulować proces degradacji, ale nie znoszą nadrzędnej roli architektury porowatej.** Taki wniosek jest ważny, ponieważ porządkuje hierarchię czynników wpływających na zachowanie porowatych materiałów żelaznych.

**Badania biologiczne oceniam pozytywnie, choć z zastrzeżeniem, że mają one charakter wstępny i modelowy.** Zastosowanie komórek śródbłonna, makrofażów oraz testów żywności i markerów zapalnych pozwala na ocenę podstawowych aspektów odpowiedzi komórkowej na produkty degradacji. **Autorka trafnie interpretuje te badania nie jako pełną**

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

ocenę klinicznej biogodności, ale jako wskaźnik mikrośrodowiska chemicznego generowanego przez degradujące materiały. Jest to ostrożne i naukowo poprawne podejście. W przyszłości część biologiczna wymagałaby jednak rozszerzenia o badania bezpośredniego kontaktu komórek z materiałem, dłuższe czasy inkubacji, modele przepływowe oraz bardziej zaawansowane testy hemokompatybilności i odpowiedzi zapalnej. **W obecnej formie stanowi ona wartościowe uzupełnienie badań materiałowych, ale nie wyczerpuje problemu biogodności potencjalnych implantów.**

Rozprawa ma również ograniczenia, które należy odnotować. Najważniejsze z nich dotyczą braku pełnej, ilościowej charakterystyki mechanicznej otrzymanych struktur, szczególnie w funkcji postępu degradacji. W przypadku materiałów rozważanych w kontekście rusztowań naczyniowych lub innych implantów porowatych powiązanie degradacji z utratą integralności mechanicznej jest kluczowe. Kolejnym ograniczeniem jest jakościowy charakter części analiz produktów korozji. W przyszłości warto byłoby rozszerzyć je o bardziej zaawansowane techniki, takie jak XPS, spektroskopia Mössbauera, ilościowa analiza fazowa metodą Rietvelde czy techniki *in situ/operando*. Pewnym ograniczeniem jest także demonstrator geometrii stentowej, który ma raczej charakter dowodu możliwości technologicznej niż realnego prototypu aplikacyjnego. Nie traktuję tego jako wady dyskwalifikującej, ponieważ sama Autorka zachowuje w tym zakresie właściwą ostrożność interpretacyjną.

Do najmocniejszych stron rozprawy zaliczam aktualność tematyki, dobre osadzenie w literaturze, interdyscyplinarność, szeroki zakres metod badawczych oraz próbę stworzenia spójnego modelu interpretacyjnego degradacji porowatych struktur żelaznych. Praca pokazuje, że Doktorantka potrafi samodzielnie analizować złożone układy materiałowe, łączyć wyniki badań strukturalnych, chemicznych i biologicznych oraz formułować wnioski wykraczające poza prosty opis eksperymentów. Szczególnie cenne jest to, że rozprawa nie sprowadza się do wytworzenia i scharakteryzowania kolejnych próbek, ale dotyczy głębszego problemu: jak projektować architekturę i powierzchnię materiału, aby kontrolować degradację i odpowiedź biologiczną. Do słabszych stron zaliczam brak



prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

pogłębionej ilościowej charakterystyki mechanicznej, ograniczenia części biologicznej oraz miejscami zbyt swobodny styl pisania.

Podczas publicznej obrony proponuję zadać Doktorantce następujące pytania:

- (1) W pracy Kandydatka wskazuje, że architektura porowata może być ważniejszym czynnikiem regulującym degradację niż sam skład stopowy. Jakie parametry architektury porowatej można uznać za najważniejsze do ilościowego opisu tego efektu?
- (2) Jak wyjaśnić brak prostej korelacji między parametrami elektrochemicznymi, a długoterminowym ubytkiem masy w strukturach porowatych?
- (3) Warstwa produktów korozji jest w pracy traktowana jako dynamiczny regulator degradacji. Jakie techniki analityczne należałoby zastosować w dalszych badaniach, aby ilościowo opisać jej skład, grubość, porowatość i stabilność?
- (4) Jakie są główne ograniczenia modelu ekstraktowego w ocenie biogodności porowatych struktur żelaznych i jakie doświadczenia należałoby wykonać jako następny etap?
- (5) W jaki sposób pozostałości po szablonach polimerowych, szczególnie w przypadku poliuretanu, mogą wpływać na inicjację korozji i odpowiedź biologiczną?
- (6) Czy w świetle uzyskanych wyników można uznać, że opracowane struktury mają większy potencjał jako materiały do zastosowań naczyniowych, czy raczej jako porowate implanty kostne? Proszę uzasadnić odpowiedź.
- (7) Jak wyjaśnić łagodniejszy profil odpowiedzi makrofagów dla wybranych próbek zawierających mangan, mimo że mangan może przyspieszać degradację żelaza?
- (8) Jakie warunki musiałaby spełnić technologia replikacji przestrzennej, aby mogła zostać realnie wykorzystana do wytwarzania funkcjonalnych geometrii stentowych?

Dorobek naukowy mgr inż. Gabrieli Gąsior należy uznać za spójny i adekwatny do etapu kariery osoby ubiegającej się o stopień doktora nauk chemicznych. Kandydatka jest współautorką 5 artykułów w recenzowanych czasopismach międzynarodowych, dotyczących głównie biodegradowalnych materiałów na bazie żelaza, ich charakterystyki, degradacji

**WYDZIAŁ CHEMII**

prof. dr hab. Łukasz JOHN  
Kierownik Zespołu Chemii Biomateriałów  
Zakład Technologii Chemicznej  
ul. F. Joliot-Curie 14  
50-383 Wrocław  
e-mail: lukasz.john@uwr.edu.pl

korozyjnej oraz odpowiedzi biologicznej. Uczestniczyła w projektach badawczych, w tym NCN PRELUDIUM BIS i NAWA, odbyła staże zagraniczne oraz prezentowała wyniki badań na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Jej dorobek potwierdza konsekwentnie rozwijane zainteresowania naukowe, dobrą aktywność publikacyjną oraz umiejętność prowadzenia badań interdyscyplinarnych z zakresu chemii, inżynierii materiałowej i biomateriałów.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Gabrieli Gąsior stanowi wartościowe i samodzielne opracowanie naukowe dotyczące degradacji porowatych materiałów żelaznych w kontekście potencjalnych zastosowań biomedycznych. Praca zawiera oryginalne elementy naukowe, zwłaszcza w zakresie interpretacji degradacji jako procesu kontrolowanego przez architekturę porowatą, transport masy i stabilność warstwy produktów korozji. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością literatury, umiejętnością planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, zdolnością krytycznej interpretacji wyników oraz kompetencją w integrowaniu zagadnień chemicznych, materiałowych i biologicznych. Wskazane w recenzji ograniczenia mają charakter przede wszystkim metodologiczny, redakcyjny i rozwojowy, nie podważają jednak zasadniczej wartości rozprawy. W mojej ocenie przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Gabrieli Gąsior spełnia wymogi i warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” stawiane pracom składanym przez osoby ubiegające się o stopień naukowy doktora, ponieważ prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Kandydatki w dyscyplinie nauki chemiczne, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z tym z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania, w tym do publicznej obrony rozprawy, a po jej pomyślnym przebiegu – o nadanie stopnia doktora.