



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Poznań, 10.06.2026 r.

**RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabrieli Gąsior**

**pt. *Biodegradowalne materiały na bazie żelaza – wpływ porowatej architektury i stabilności warstwy produktów korozji na proces degradacji oraz odpowiedź biologiczną***

Przedłożona do oceny praca doktorska została wykonana na Wydziale Chemii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Promotorem pracy jest dr hab. Aleksandra Radtke, prof. UMK. Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Nauki Chemiczne dr hab. Urszuli Kiełkowskiej, prof. UMK z dnia 08.05.2026 r.

Choroby układu sercowo-naczyniowego pozostają jedną z głównych przyczyn zachorowalności i śmiertelności na świecie. W związku z tym od wielu lat prowadzone są intensywne badania nad nowoczesnymi biomateriałami przeznaczonymi do wytwarzania implantów naczyniowych, które mogłyby skutecznie wspierać proces leczenia, a jednocześnie eliminować ograniczenia związane z obecnością trwałych materiałów w organizmie pacjenta.

Szczególne zainteresowanie budzą obecnie biodegradowalne materiały metaliczne, które łączą korzystne właściwości mechaniczne z możliwością stopniowej resorpcji po zakończeniu pełnienia funkcji terapeutycznej. Wśród nich żelazo i jego stopy są postrzegane jako jedne z najbardziej perspektywicznych materiałów, jednak ich praktyczne zastosowanie ogranicza przede wszystkim zbyt wolne tempo degradacji w warunkach fizjologicznych. Z tego względu istotnym zagadnieniem naukowym pozostaje poznanie czynników wpływających na przebieg procesów korozyjnych oraz odpowiedź biologiczną organizmu.

W ten nurt badań wpisuje się 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*”. Tematyka pracy jest aktualna, ważna zarówno z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia oraz dobrze wpisuje się w dyscyplinę nauki chemiczne. Celem rozprawy było określenie wpływu architektury porowatej oraz stabilności warstwy produktów korozji na przebieg degradacji materiałów żelaznych oraz ich oddziaływanie biologiczne.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Na podkreślenie zasługuje fakt, że badania stanowiące podstawę rozprawy były realizowane w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki PRELUDIUM BIS nr 2019/35/O/ST5/00405. Fakt uzyskania finansowania w ramach konkursu świadczy o wysokiej ocenie potencjału naukowego proponowanej problematyki badawczej oraz jej znaczeniu dla rozwoju dyscypliny. Należy zaznaczyć, że koncepcja badań została wcześniej poddana ocenie niezależnych ekspertów i pozytywnie zweryfikowana w konkurencyjnym postępowaniu grantowym. Stanowi to dodatkowe potwierdzenie aktualności podjętej tematyki oraz jej istotnego znaczenia poznawczego i aplikacyjnego.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i liczy 381 stron. Pracę rozpoczynają podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykaz stosowanych skrótów. Zasadnicza część rozprawy została podzielona na część teoretyczną i doświadczalną.

Część teoretyczna obejmuje rozdziały poświęcone klinicznym uwarunkowaniom rozwoju biodegradowalnych rusztowań naczyniowych, charakterystyce materiałów stosowanych w konstrukcji stentów oraz przeglądowi aktualnego stanu wiedzy dotyczącego biodegradowalnych metali. Szczególnie obszernie omówiono właściwości żelaza jako materiału biomedycznego, mechanizmy jego degradacji, biogodność, właściwości mechaniczne oraz możliwości zastosowania w konstrukcji implantów naczyniowych. W kolejnych rozdziałach przedstawiono metody otrzymywania materiałów na bazie żelaza, wpływ mikrostruktury i porowatości na przebieg procesów degradacyjnych, zagadnienia związane ze stopowaniem oraz modyfikacją powierzchni materiałów żelaznych. Część literaturową zamyka rozdział przedstawiający autorskie ramy interpretacyjne degradacji porowatych struktur żelaznych w świetle dostępnych danych literaturowych.

Część doświadczalna rozpoczyna się od przedstawienia koncepcji badań, założeń projektowych oraz zastosowanych materiałów i metod badawczych. Następnie Doktorantka opisuje proces otrzymywania porowatych materiałów na bazie żelaza, ich charakterystykę strukturalną i porowatościową, badania degradacji prowadzone w warunkach statycznych i dynamicznych oraz wyniki badań biologicznych *in vitro*. Osobny rozdział poświęcono wykonaniu demonstratora geometrii stentowej.

Pracę kończą wnioski końcowe, rozdział poświęcony nowości naukowej rozprawy, propozycje dalszych kierunków badań oraz bibliografia obejmująca 623 pozycje literaturowe. Dodatkowo rozprawa zawiera dwa aneksy dotyczące historii rozwoju leczenia chorób serca oraz technologii formowania i projektowania polimerowych stentów bioresorbowalnych.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Część teoretyczna rozprawy obejmuje bardzo obszerny przegląd literatury dotyczącej biodegradowalnych materiałów metalicznych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów na bazie żelaza przeznaczonych do zastosowań biomedycznych. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy oraz umiejętnością krytycznej analizy literatury naukowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że przegląd literatury nie ogranicza się wyłącznie do wyników badań podstawowych, ale uwzględnia również rozwiązania komercyjne, wyniki badań przedklinicznych oraz aktualny stan wdrożeń klinicznych. Takie podejście świadczy o dojrzałości naukowej Autorki oraz umiejętności postrzegania badanego problemu w szerszym kontekście aplikacyjnym i rynkowym.

Pozytywnie oceniam również liczne odniesienia do ograniczeń istniejących rozwiązań oraz próbę krytycznej oceny potencjału materiałów na bazie żelaza. Szczególnie trafne wydaje się stwierdzenie zawarte w rozdziale poświęconym właściwościom żelaza: *„Celem niniejszego rozdziału nie jest idealizacja żelaza, lecz krytyczna analiza jego rzeczywistego potencjału i ograniczeń w świetle współczesnej wiedzy materiałowej. Ma to stanowić punkt odniesienia dla dalszych rozważań doświadczalnych.”* W mojej opinii zdanie to bardzo dobrze oddaje sposób prowadzenia narracji naukowej przez Doktorantkę i świadczy o dojrzałym podejściu do realizowanego tematu badawczego.

Jednocześnie, zgodnie z rolą recenzenta, chciałbym zwrócić uwagę na kilka kwestii, które mogłyby zostać dopracowane. Przede wszystkim część literaturowa jest bardzo obszerna. Doceniam intencję Doktorantki polegającą na możliwie szerokim wprowadzeniu czytelnika w tematykę rozprawy, jednak moim zdaniem niektóre zagadnienia mogły zostać przedstawione w sposób bardziej syntetyczny. Umiejętność selekcji informacji i przygotowania zwięzłego przeglądu literatury obejmującego najistotniejsze aspekty badanego problemu stanowi jedną z ważnych kompetencji warsztatu naukowego.

Pewne uwagi dotyczą również wykazu stosowanych skrótów. Przykładowo, dla kwasu acetylosalicylowego zastosowano dwa skróty (ASA oraz AA). Chociaż w dalszej części pracy Doktorantka wyjaśnia przyczyny takiego rozwiązania, w mojej opinii, na potrzeby niniejszej rozprawy, wystarczające byłoby konsekwentne stosowanie jednego oznaczenia. Podobna sytuacja dotyczy skrótu CVD, który w wykazie odnosi się zarówno do chorób sercowo-naczyniowych (Cardiovascular Disease), jak i do chemicznego osadzania z fazy gazowej (Chemical Vapor Deposition). W tabeli skrótów zastosowano wprawdzie dodatkowe oznaczenia „(med.)” oraz „(tech.)”, jednak w dalszej części rozprawy rozróżnienie to nie jest konsekwentnie utrzymywane, co może utrudniać odbiór tekstu.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

W pracy występują także pojedyncze uchybienia redakcyjne, takie jak nieuzasadnione podziały akapitów i dodatkowe odstępy pomiędzy fragmentami tekstu (przykładowo na stronach 44 i 69). Mają one jednak charakter techniczny i nie wpływają na wartość merytoryczną przedstawionych rozważań.

Pomimo wskazanych uwag oceniam część teoretyczną rozprawy jako wartościową i stanowiącą solidną podstawę do realizacji przedstawionych badań eksperymentalnych.

Przechodząc do oceny części doświadczalnej, należy podkreślić, że zakres przeprowadzonych badań jest bardzo szeroki i obejmuje zarówno opracowanie technologii otrzymywania porowatych materiałów na bazie żelaza, jak również ich kompleksową charakterystykę fizykochemiczną, degradacyjną i biologiczną. Dobór zastosowanych metod należy uznać za właściwy i odpowiadający postawionym celom.

W rozdziale poświęconym opracowaniu technologii wytwarzania materiałów Doktorantka szeroko opisuje napotkane problemy technologiczne, w tym trudności związane z funkcjonowaniem aparatury oraz występujące awarie systemu procesowego. Z jednej strony informacje te pokazują rzeczywisty przebieg prac eksperymentalnych i skalę wyzwań, z jakimi musiała zmierzyć się Autorka podczas realizacji badań. Z drugiej jednak strony nie jestem przekonany, czy tak szczegółowe omówienie problemów aparaturowych jest niezbędne w rozprawie doktorskiej, szczególnie, że nie stanowią one zasadniczego elementu osiągnięcia naukowego przedstawionego w pracy.

Jednocześnie w mojej opinii część metodyczna mogłaby zostać uzupełniona o bardziej szczegółowe informacje umożliwiające odtworzenie przeprowadzonych badań przez innych badaczy. Co prawda Doktorantka zamieściła tabelaryczne zestawienie głównych problemów technologicznych, ich przyczyn oraz wdrożonych działań korygujących podczas optymalizacji procesu wytwarzania pian żelaznych, jednak przedstawione informacje mają charakter dość ogólny. W pracy wielokrotnie podkreślono, że opracowanie odpowiedniej technologii wymagało licznych prób i modyfikacji parametrów procesu, natomiast czytelnik nie zawsze może jednoznacznie powiązać opisywane problemy z konkretnymi materiałami. Z punktu widzenia rozwoju dyscypliny szczególnie wartościowe byłoby przedstawienie bardziej szczegółowego zestawienia przeprowadzonych prób wraz z najważniejszymi przyczynami ich niepowodzeń. Pozwoliłoby to nie tylko lepiej udokumentować proces dochodzenia do ostatecznej technologii, ale również mogłoby stanowić cenne źródło wiedzy dla innych zespołów badawczych podejmujących podobną tematykę, ograniczając konieczność powtarzania nieskutecznych rozwiązań technologicznych.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Przedstawione wyniki badań są obszerne i obejmują zarówno charakterystykę strukturalną otrzymanych materiałów, badania degradacyjne prowadzone w różnych warunkach środowiskowych, jak również ocenę odpowiedzi biologicznej. Na szczególne podkreślenie zasługuje długoterminowy charakter części badań degradacyjnych, co pozwoliło na obserwację zmian zachodzących w materiale w szerszej perspektywie czasowej. Pozytywnie oceniam również uwzględnienie badań prowadzonych w warunkach przepływowych. Rozdział dotyczący degradacji materiałów w modelu dynamicznym należy uznać za jeden z ciekawszych elementów rozprawy, ponieważ zastosowane podejście w większym stopniu odzwierciedla rzeczywiste warunki pracy potencjalnych implantów niż klasyczne badania statyczne.

Jednocześnie sposób prezentacji części wyników mógłby zostać dopracowany. W wielu przypadkach opisy rysunków są zbyt lakoniczne, przez co czytelnik zmuszony jest do poszukiwania dodatkowych informacji w tekście głównym. Przykładowo na rysunku 17.1 nie wyjaśniono znaczenia oznaczeń a), b), c) i d), na rysunku 17.3 nie jest jednoznacznie wskazane, którego rodzaju pian dotyczą przedstawione wyniki, natomiast na rysunku 17.4 nie podano rodzaju zastosowanego szablonu. Na rysunku 17.7 zabrakło obrazów SEM, które ułatwiłyby interpretację przedstawionych danych, natomiast określenie „powiększenie w mikrometrach” użyte w opisie rysunku 17.9 jest nieprecyzyjne i wymaga doprecyzowania. Są to pozornie drobne kwestie, jednak ich dopracowanie znacząco poprawiłoby czytelność pracy.

Pewien niedosyt pozostawia również zakres prezentowanych wyników charakterystyki materiałów. Na podstawie obrazów SEM przedstawionych na rysunku 17.1 wyznaczono wielkość porów, jednak w pracy nie przedstawiono szczegółowo sposobu przeprowadzenia tych obliczeń. W przypadku analiz EDX bardziej przejrzyste byłoby uzupełnienie rozprawy o zestawienia tabelaryczne zawierające wyniki ilościowe. W rozdziale dotyczącym porowatości Doktorantka słusznie wskazuje ograniczenia zastosowanych metod badawczych oraz potrzebę wykorzystania technik uzupełniających. W przyszłych badaniach warto rozważyć zastosowanie piknometrii gazowej, która mogłaby dostarczyć dodatkowych informacji dotyczących charakterystyki porowatości badanych materiałów.

Zabrakło również pełniejszej charakterystyki materiałów pokrytych powłokami PCL oraz PCL-ASA. W szczególności interesujące byłoby przedstawienie wyników badań morfologicznych pozwalających ocenić sposób pokrycia rozwiniętej struktury porowatej warstwą polimerową oraz wpływ powłoki na podstawowe parametry strukturalne materiału. W mojej opinii taka charakterystyka byłaby szczególnie istotna w kontekście późniejszej interpretacji wyników badań degradacyjnych oraz biologicznych.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Pozytywnie oceniam próbę wykonania demonstratora geometrii stentowej, która pokazuje potencjał aplikacyjny opracowanej technologii. Szkoda jednak, że badania te nie zostały przeprowadzone na materiale w większym stopniu odpowiadającym układom analizowanym we wcześniejszych etapach pracy. W mojej opinii dodatkową wartość poznawczą miałyby również uwzględnienie w badaniach degradacyjnych materiału litego jako układu odniesienia. Pozwoliłoby to w sposób bardziej bezpośredni określić wpływ samej porowatości na przebieg procesów degradacyjnych oraz właściwości biologiczne badanych materiałów.

Przedstawiona rozprawa stanowi wartościowe opracowanie naukowe i dostarcza wielu interesujących wyników dotyczących wpływu architektury porowatej na proces degradacji materiałów na bazie żelaza. Lektura pracy nasuwa jednak kilka wątpliwości, które moim zdaniem zasługują na dodatkowe wyjaśnienie podczas publicznej obrony rozprawy.

1. Doktorantka stwierdza, że w architekturze PU efekt dodatku manganu jest wyraźniejszy niż efekt dodatku miedzi. Czy obserwowane różnice nie wynikają częściowo z odmiennej zawartości obu dodatków stopowych?
2. W badaniach zmian pH zabrakło informacji dotyczących próby kontrolnej obejmującej sam roztwór Hanksa poddany identycznym warunkom eksperymentalnym. W jaki sposób monitorowano naturalne zmiany parametrów roztworu zachodzące niezależnie od obecności badanego materiału?
3. W rozdziale dotyczącym degradacji w warunkach przepływowych Doktorantka wskazuje, że ciągłe usuwanie produktów korozji zapobiega tworzeniu stabilnej warstwy pasywnej. Czy stwierdzenie to jest w pełni uzasadnione w przypadku układu pracującego w obiegu zamkniętym, w którym produkty degradacji pozostają w medium badawczym?
4. W jaki sposób nanoszono powłoki PCL oraz PCL-ASA na porowate materiały żelazne? Czy przeprowadzono ocenę jednorodności pokrycia oraz wpływu powłoki na rzeczywistą geometrię i porowatość materiału?
5. W pracy wykazano obecność pozostałości węgla po procesie usuwania szablonów polimerowych. Czy możliwe jest oszacowanie ilości tego składnika w gotowym materiale? Jakie są przewidywania dotyczące losu takich pozostałości po całkowitej degradacji żelaza w warunkach organizmu człowieka? Czy ich wielkość i forma występowania umożliwiłyby naturalne usunięcie z organizmu?
6. W rozdziale dotyczącym kierunków dalszych badań pojawiają się odniesienia do zagadnień związanych z osteointegracją. Czy oznacza to, że opracowane materiały mogą znaleźć zastosowanie również w implantologii kostnej? Jakim, zdaniem Doktorantki, jest docelowe i najbardziej perspektywiczne zastosowanie materiałów opracowanych w ramach niniejszej rozprawy?



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Powyższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej przedstawionej rozprawy. Wręcz przeciwnie, wynikają z dużego zakresu przeprowadzonych badań oraz licznych interesujących obserwacji przedstawionych przez Doktorantkę.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy zaliczam opracowanie i optymalizację technologii wytwarzania porowatych materiałów na bazie żelaza oraz kompleksową ocenę wpływu ich architektury na przebieg procesów degradacyjnych i odpowiedź biologiczną. Szczególnie cenne jest wykazanie znaczenia porowatości i charakteru warstwy produktów korozji w kształtowaniu właściwości biodegradowalnych materiałów żelaznych.

Na podkreślenie zasługuje również interdyscyplinarny charakter przeprowadzonych badań, obejmujących zagadnienia materiałowe, elektrochemiczne i biologiczne, a także uwzględnienie badań degradacyjnych prowadzonych zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych. Wartościowym elementem pracy jest również próba usystematyzowania mechanizmów degradacji porowatych materiałów żelaznych oraz zaproponowanie modelu interpretacyjnego uwzględniającego wpływ architektury materiału i stabilności warstwy produktów korozji. Za szczególnie wartościowy uważam fakt, że Doktorantka nie ograniczyła się do opisu szybkości degradacji materiałów, lecz podjęła próbę wyjaśnienia mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane różnice pomiędzy badanymi architekturami porowatymi.

Przedstawione wyniki stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej biodegradowalnych materiałów na bazie żelaza i mogą stanowić podstawę do dalszych prac nad materiałami przeznaczonymi do zastosowań biomedycznych.

Podsumowując, stwierdzam, że 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”* stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ust. 1–2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

Przedstawione w recenzji uwagi mają charakter przede wszystkim dyskusyjny, redakcyjny oraz warsztatowy i wynikają z obowiązku rzetelnej oceny rozprawy. Nie wpływają na moją pozytywną ocenę wartości naukowej pracy. Pozostałe uwagi i pytania traktuję jako zaproszenie do dyskusji naukowej podczas publicznej obrony rozprawy.



dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP  
WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań  
tel.: +48 (61) 665 37 23  
e-mail: mariusz.sandomierski@put.poznan.pl

Na pozytywną ocenę zasługuje również aktywność naukowa Doktorantki. Wyniki badań prowadzonych przez Doktorantkę zostały opublikowane w pięciu artykułach naukowych w czasopismach międzynarodowych. Na uwagę zasługuje także odbycie zagranicznych staży naukowych, w tym w ramach COST Action na University of Malta oraz sześciomiesięcznego stażu badawczego w Michigan Technological University. Dorobek ten, uzupełniony aktywnym uczestnictwem w konferencjach naukowych oraz działalnością dydaktyczną, potwierdza potencjał naukowy Doktorantki oraz jej przygotowanie do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie Pani mgr inż. Gabrieli Gąsior do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki chemiczne.

*Sandomierski*

.....  
Dr hab. inż. Mariusz Sandomierski, prof. PP