

Wrocław, 24-10-2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Tetiany Dyrdy-Terniuk pt. „Opracowanie metodologii do kompleksowej analizy biokoloidów oraz ich wykorzystanie na potrzeby przemysłu

Badania będące podstawą przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej zostały wykonane w Interdyscyplinarnym Centrum Nowoczesnych Technologii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu pod kierunkiem dr hab. Pawła Pomastowskiego, prof. UMK. Tematyka pracy koncentruje się na kompleksowej charakterystyce biokoloidów pochodzenia mleczarskiego oraz możliwościach ich ukierunkowanej modyfikacji w celu nadania nowych właściwości funkcjonalnych i aplikacyjnych. Szczególne miejsce w ocenianej rozprawie zajmują dwa najważniejsze białka mleka, kazeina oraz laktoferyna, a także próby wykorzystania mikroorganizmów probiotycznych do biologicznej modyfikacji składu śmietanki. Poruszana w pracy problematyka doskonale wpisuje się w aktualne światowe trendy związane z wysokowartościowym zagospodarowaniem surowców mleczarskich, gospodarką obiegu zamkniętego, projektowaniem żywności funkcjonalnej oraz rozwojem biomateriałów i systemów dostarczania substancji aktywnych. Poznanie molekularnych podstaw właściwości składników mleka oraz możliwości ich racjonalnego kształtowania pozostaje jednym z najważniejszych wyzwań współczesnej technologii żywności, chemii biologicznej i nutraceutyki. Przedstawiona rozprawa odpowiada na wiele z tych wyzwań i stanowi interesującą próbę połączenia badań podstawowych z potencjalnymi zastosowaniami przemysłowymi.

Przedstawiona rozprawa została przygotowana w formie przewodnika obejmującego pięć artykułów naukowych opublikowanych w latach 2023-2026. Łączny współczynnik oddziaływania czasopism wynosi 25,8, natomiast sumaryczna punktacja ministerialna osiąga 650 punktów. Konstrukcja rozprawy jest bardzo spójna i logiczna. Pomimo pozornej różnorodności tematów wszystkie publikacje podporządkowane są jednemu nadrzędnemu celowi, którym jest poznanie właściwości biokoloidów mlecznych oraz opracowanie narzędzi służących ich funkcjonalizacji i wykorzystaniu. Na szczególne uznanie zasługuje

fakt, że kolejne publikacje tworzą ciąg logicznie powiązanych działań badawczych, począwszy od charakterystyki biomolekuł mlecznych, przez ich oczyszczanie i analizę, aż po konstruowanie nowych układów bioaktywnych wykorzystujących jony srebra i rutenu.

W przeciwieństwie do wielu rozpraw opartych na cyklu publikacji, oceniana praca wykazuje wyraźną ciągłość koncepcyjną. Szczególną uwagę zwraca tu bardzo szeroki wachlarz zastosowanych metod badawczych. Doktorantka wykorzystała między innymi chromatografię cieczową HPLC, chromatografię gazową GC-MS, spektrometrię mas MALDI-TOF/MS, ICP-OES, ICP-MS, spektroskopię fluorescencyjną, ATR-FTIR, SRCD, SAXS, DLS, pomiary potencjału zeta, mikroskopię elektronową SEM i TEM, elektroforezę SDS-PAGE oraz zaawansowane metody obliczeniowe obejmujące dokowanie molekularne, dynamikę molekularną i obliczenia DFT. Szczególnie wysoko oceniam fakt, że metody te nie zostały wykorzystane jako zbiór niezależnych technik, ale wzajemnie się uzupełniają, tworząc wielowymiarowy obraz badanych układów. Takie podejście świadczy o bardzo dobrej dojrzałości eksperymentalnej i metodologicznej Doktorantki.

Rozprawa liczy ponad 230 stron i zawiera obszerne wprowadzenie teoretyczne, jasno sformułowane cele badawcze, prezentację publikacji, podsumowanie wyników i bardzo bogaty dorobek naukowy Autorki a także oświadczenia współautorów. Wprowadzenie należy do mocnych stron rozprawy. Doktorantka przedstawia aktualne problemy przemysłu mleczarskiego, zagadnienia związane z biokoloidami mlecznymi, strukturą i funkcjonalnością kazeiny oraz laktoferyny, a także znaczeniem biofortyfikacji żywności. Szczególnie interesujące jest spojrzenie na składniki mleka nie jako klasyczne substancje odżywcze, lecz jako programowalne układy molekularne zdolne do pełnienia funkcji nośników i platform biomateriałowych. Jednocześnie należy zauważyć, że wprowadzenie jest niezwykle obszerne i momentami przybiera formę bardzo szczegółowego opracowania przeglądowego. Miejscami brakuje bardziej wyraźnego wskazania luki badawczej, która bezpośrednio prowadziłaby do przedstawionych celów rozprawy. Cel pracy jest jednak sformułowany jasno i logicznie.

Najważniejszą część rozprawy stanowią publikacje tworzące spójny cykl badawczy. Pierwsza publikacja dotycząca immobilizacji jonów Ag(I) na kazeinie stanowi bardzo interesujący przykład połączenia chemii koordynacyjnej z biopolimerami mlecznymi. Doktorantka wykazała, że odsolenie kazeiny prowadzi do znacznego wzrostu zdolności wiązania jonów Ag(I) . Szczególnie wartościowe są kompleksowe badania mechanizmu oddziaływań obejmujące modelowanie izoterm sorpcji, badania spektroskopowe i mikroskopowe. Na uznanie zasługuje wykazanie możliwości tworzenia nanostruktur srebra w matrycy białkowej. Jednocześnie interpretacja procesu bioredukcji Ag(I) mogłaby zostać głębiej rozwinięta. Nie jest do końca jasne, jaki jest względny udział poszczególnych aminokwasów w procesie redukcji metalu oraz czy można jednoznacznie rozdzielić efekt kompleksowania od efektu nukleacji

nanocząstek. Szczególne miejsce w rozprawie zajmuje publikacja przeglądowa dotycząca laktoferyny. Artykuł ten nie prezentuje wyników eksperymentalnych, ale stanowi niezwykle wartościowe kompendium wiedzy na temat struktury, właściwości i zastosowań tego białka. Opracowanie zostało przygotowane na bardzo wysokim poziomie i bez wątplenia świadczy o doskonałej znajomości literatury przez Doktorantkę. Kolejna publikacja dotycząca wpływu ultrafiltracji na właściwości laktoferyny ma duże znaczenie metodologiczne. Autorka wykazała, że odpowiednie oczyszczanie preparatów białkowych istotnie wpływa na jakość późniejszych analiz instrumentalnych. Jest to aspekt często niedoceniany, a mający kluczowe znaczenie dla wiarygodności wyników. Bardzo interesujące są wyniki przedstawione w pracy dotyczącej biofortyfikacji śmietanki przy użyciu *Lactiplantibacillus plantarum*. Autorka zaproponowała nowatorskie podejście do wzbogacania produktów mlecznych witaminą D3. Szczególnie cenne jest zestawienie wpływu warunków inkubacji, formy preparatu bakteryjnego oraz zmian profilu kwasów tłuszczowych. Jednocześnie ta część rozprawy pozostawia pewien niedosyt mechanistyczny. Nie jest bowiem jednoznacznie wykazane, czy obserwowany wzrost zawartości witaminy D3 wynika bezpośrednio z aktywności bakterii czy też z pośrednich procesów zachodzących w układzie. Najbardziej zaawansowaną częścią rozprawy jest publikacja dotycząca układów laktoferyna-ruten. Jest to bez wątpienia najdojrzalsza naukowo część całego cyklu. Na szczególne wyróżnienie zasługuje połączenie wyników eksperymentalnych z modelowaniem molekularnym, badaniami SAXS, SRCD oraz analizą biologiczną. Kompleksowa charakterystyka tych układów świadczy o bardzo dużej samodzielności badawczej Doktorantki. Szczególnie wysoko oceniam próbę wykorzystania laktoferyny jako aktywnego rusztowania koordynacyjnego dla jonów rutenu.

Szczegółowa ocena publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej:

Publikacja 1: Immobilization of silver ions onto casein, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2023) 667:131390. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.131390

Jest to pierwsza publikacja tworząca fundament całego cyklu badawczego. Autorka podjęła bardzo interesujący problem wykorzystania kazeiny jako naturalnej matrycy do immobilizacji jonów Ag(I) i tworzenia układów o potencjale przeciwdrobnoustrojowym. Na szczególne podkreślenie zasługuje wykorzystanie kompleksu amoniakalnego srebra jako stabilnego prekursora Ag(I), co pozwoliło przeprowadzić proces modyfikacji w kontrolowanych warunkach alkalicznych. Autorka wykazała się dobrą znajomością zarówno chemii koordynacyjnej, jak i właściwości układów koloidalnych. Za szczególnie wartościowe uważam przeprowadzenie kompleksowej charakterystyki otrzymanych układów

obejmującej badania sorpcyjne, spektroskopowe, mikroskopowe oraz biologiczne. Istotnym osiągnięciem jest wykazanie wpływu odsalania białka na zwiększenie zdolności wiązania Ag(I), co posiada znaczenie nie tylko poznawcze, lecz także praktyczne. Dużą wartość mają również badania wskazujące na możliwość powstawania nanostruktur srebra w matrycy białkowej. Pewnym ograniczeniem pracy pozostaje brak bezpośredniej identyfikacji dominujących miejsc koordynacji Ag(I) metodami o wyższej rozdzielczości strukturalnej. Przedstawione wyniki dostarczają mocnych przesłanek dotyczących udziału reszt Asp, Glu oraz fosfoseryny, jednak nie pozwalają jednoznacznie określić geometrii koordynacyjnej poszczególnych centrów wiążących.

W mojej ocenie publikacja stanowi bardzo wartościowy wkład do badań nad biomateriałami na bazie białek mlecznych i zasługuje na wysoką ocenę. Doktorantka jest pierwszym autorem artykułu i odpowiadała za opracowanie koncepcji badań, realizację większości eksperymentów, analizę wyników oraz przygotowanie manuskryptu. Zakres wykonanej pracy jednoznacznie wskazuje na jej dominujący i wiodący udział w powstaniu publikacji.

Publikacja 2: The multifaceted roles of bovine lactoferrin: Molecular structure, isolation methods, analytical characteristics, and biological properties, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (2023) 71, 20500–20531. Doi:10.1021/acs.jafc.3c06887

Publikacja ma charakter przeglądowy, jednak jej znaczenie dla całej rozprawy jest bardzo duże. Artykuł stanowi obszerne, krytyczne opracowanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego laktoferyny bydlęcej. Szczególnie wysoko oceniam szerokość przedstawionej problematyki obejmującej strukturę molekularną, właściwości fizykochemiczne, glikozylację, koordynację metali, metody izolacji oraz potencjalne zastosowania biomedyczne i nutraceutyczne. Niewątpliwą zaletą pracy jest umiejętne połączenie informacji pochodzących z wielu obszarów badawczych. Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością literatury światowej oraz umiejętnością krytycznej analizy i syntetycznego opracowania dużej ilości danych w spójny i logiczny sposób.

Artykuł ten stanowi istotne przygotowanie teoretyczne dla późniejszych badań eksperymentalnych realizowanych w ramach doktoratu. Pokazuje również dojrzałość naukową Doktorantki oraz jej zdolność do krytycznej analizy literatury. Doktorantka jest pierwszym autorem publikacji i głównym twórcą opracowania. Przygotowanie tak obszernego artykułu przeglądowego wymagało przeprowadzenia bardzo szerokiej analizy literatury, samodzielnego opracowania koncepcji pracy oraz krytycznej syntezy aktualnego stanu wiedzy.

Publikacja 3: Impact of ultrafiltration on the physicochemical properties of bovine lactoferrin: Insights into molecular mass, surface morphology, and elemental composition, *Journal of Dairy Science* (2024) 107, 10280–10298. Doi: 10.3168/jds.2024-24933

Publikacja podejmuje niezwykle istotny problem wpływu procedur przygotowania próbek na jakość późniejszych analiz białek. Temat ten często traktowany jest jako zagadnienie techniczne, podczas gdy Autorka wykazała jego bezpośredni wpływ na wiarygodność danych analitycznych. Za najważniejsze osiągnięcie publikacji uważam wykazanie, że ultrafiltracja prowadzi do wyraźnej poprawy jakości analiz MALDI-TOF/MS poprzez eliminację soli i innych zanieczyszczeń niskocząsteczkowych. Uzyskane rezultaty posiadają znaczenie praktyczne dla wszystkich badań prowadzonych z wykorzystaniem laktoferyny oraz innych białek izolowanych metodami chromatograficznymi. Na uznanie zasługuje połączenie wyników elektroforezy, spektrometrii mas, pomiarów potencjału zeta oraz mikroskopii, co pozwoliło na wieloaspektową ocenę wpływu procesu oczyszczania.

Jedynym elementem, który mógłby zostać rozwinięty szerzej, jest ocena wpływu ultrafiltracji na biologiczne właściwości laktoferyny w bardziej rozbudowanych modelach biologicznych. Doktorantka była głównym wykonawcą badań, odpowiadając za ich zaprojektowanie, wykonanie analiz, interpretację danych i przygotowanie manuskryptu. Publikacja jednoznacznie świadczy o jej samodzielności eksperymentalnej.

Publikacja 4: The impact of *Lactiplantibacillus plantarum* on the cream composition: Insight into changes of vitamin D3 content and fatty acid composition, *International Dairy Journal* (2025) 161: 106118. Doi: 10.1016/j.idairyj.2024.106118

W mojej opinii jest to jedna z najbardziej innowacyjnych części rozprawy od strony aplikacyjnej. Autorka zaproponowała biologiczną metodę wzbogacania produktów mlecznych w witaminę D3 poprzez wykorzystanie aktywności metabolicznej szczepu *Lactiplantibacillus plantarum*. Na szczególną uwagę zasługują starannie zaplanowane eksperymenty obejmujące różne warunki inkubacji, różne formy preparatu bakteryjnego oraz analizę zmian w profilu kwasów tłuszczowych. Praca wykracza poza prostą analizę zawartości witaminy D3, próbując jednocześnie ocenić wpływ całego procesu na jakość produktu.

Pewien niedosyt pozostawia mechanistyczna interpretacja powstawania witaminy D3. Choć wykazano skuteczność procesu, dokładna rola bakterii i udział procesów fotochemicznych wymaga dalszych badań. Nie zmienia to jednak faktu, że publikacja posiada bardzo istotny potencjał wdrożeniowy i może stanowić podstawę do opracowania nowych produktów funkcjonalnych. Doktorantka była

inicjatorem badań i głównym autorem publikacji. Odpowiadała za koncepcję eksperymentów, analizę witaminy D3, interpretację wyników oraz przygotowanie pracy do publikacji.

Publikacja 5: Lactoferrin as an active coordination scaffold for ruthenium(III), *Inorganic Chemistry Frontiers* (2026) 13, 4867–4897. Doi: 10.1039/d6qi00255b

Uważam tę publikację za najważniejsze osiągnięcie naukowe przedstawionej rozprawy doktorskiej. Praca prezentuje wyjątkowo kompleksowe podejście do badania oddziaływań pomiędzy laktoferyną a jonami Ru(III). Połączenie badań sorpcyjnych, SAXS, SRCD, spektrofotometrii, mikroskopii elektronowej, dokowania molekularnego, dynamiki molekularnej i obliczeń DFT pozwoliło na bardzo wszechstronną charakterystykę układu. Szczególnie wysoko oceniam wykorzystanie metod obliczeniowych jako uzupełnienia danych eksperymentalnych. Autorka nie ogranicza się do prostego wykazania tworzenia kompleksów, ale próbuje zrozumieć ich mechanizmy na poziomie molekularnym. Ważnym osiągnięciem jest wykazanie wysokiej stabilności kompleksów LF-Ru przy jednoczesnym zachowaniu aktywności biologicznej. Wartość tej pracy dodatkowo podnosi jej wyraźny potencjał translacyjny związany z wykorzystaniem laktoferyny jako nośnika związków Ru(III).

Pewnym ograniczeniem pozostaje brak badań w bardziej zaawansowanych modelach biologicznych, jednak należy podkreślić, że nie było to podstawowym celem przedstawionej pracy. Doktorantka pełniła rolę lidera projektu badawczego. Odpowiadała za koncepcję badań, wykonanie znacznej części eksperymentów, interpretację wyników oraz przygotowanie publikacji. Szczególnie istotny jest fakt koordynacji współpracy z licznym zespołem współautorów reprezentujących różne specjalizacje i ośrodki naukowe. Analiza oświadczeń współautorów wskazuje jednoznacznie, że wkład Doktorantki miał charakter dominujący i obejmował wszystkie najważniejsze elementy projektu badawczego.

Analiza publikacji oraz oświadczeń współautorów prowadzi do jednoznacznego wniosku, że mgr Tetiana Dyrda-Terniuk była głównym wykonawcą i inicjatorem większości badań stanowiących podstawę rozprawy. We wszystkich pięciu publikacjach występuje jako pierwszy autor. Ponadto odpowiadała za projektowanie eksperymentów, realizację badań, analizę wyników oraz przygotowywanie manuskryptów. Szczególnie istotne jest również wykazanie przez Doktorantkę umiejętności integrowania wyników pochodzących z wielu komplementarnych technik badawczych oraz koordynowania współpracy pomiędzy zespołami reprezentującymi różne specjalizacje naukowe. W mojej ocenie udział Doktorantki w publikacjach stanowiących rozprawę doktorską jest nie tylko znaczący, ale w większości przypadków

miał charakter wiodący i twórczy, w pełni uzasadniający przedstawienie tych prac jako podstawy do nadania stopnia doktora.

Praca zawiera jednak kilka elementów, które warto poddać dyskusji podczas obrony. Przede wszystkim większość analiz biologicznych przeprowadzono na stosunkowo prostych modelach komórkowych i mikrobiologicznych. Otrzymane wyniki są bardzo interesujące, ale ich przełożenie do bardziej złożonych układów biologicznych pozostaje niepewne. W przypadku układów LF-Ru zastanawia również ograniczony zakres badań dotyczących rzeczywistego mechanizmu transportu tych kompleksów do komórek. Poniżej przedstawiam pytania, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy:

1. Na ile można wykluczyć udział procesów agregacji białek w interpretacji wyników izoterm sorpcji dla układów Ag-CN i LF-Ru?
2. Czy przeprowadzono próby określenia stechiometrii miejsc wiązania Ru(III) metodami niezależnymi od modelowania molekularnego?
3. W jaki sposób obecność glikozylacji może wpływać na koordynację Ru(III) przez laktoferynę?
4. Czy można wskazać, które z otrzymanych układów wykazują największy potencjał wdrożeniowy z punktu widzenia przemysłu mleczarskiego?
5. Jakie są główne ograniczenia wykorzystanych badań *in vitro* przy interpretacji potencjalnych zastosowań biomedycznych kompleksów LF-Ru?
6. Czy obserwowany wzrost stężenia witaminy D3 w śmietance jest wyłącznie efektem metabolicznym działania bakterii, czy mogą w nim uczestniczyć również procesy fotochemiczne?
7. W jakim stopniu obecność soli wpływa na interpretację wyników uzyskanych metodą MALDI-TOF/MS?
8. Czy możliwe byłoby wykorzystanie laktoferyny jako nośnika również dla innych metali terapeutycznych niż ruten?

Podsumowując, rozprawa mgr Tetiany Dyrdy-Terniuk stanowi bardzo wartościowe i spójne opracowanie naukowe poświęcone właściwościom biokoloidów mlecznych oraz możliwościom ich funkcjonalizacji. Największym atutem pracy jest połączenie nowoczesnych metod analitycznych, biologicznych i obliczeniowych z wyraźnym ukierunkowaniem aplikacyjnym. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego planowania badań, krytycznej analizy uzyskanych wyników oraz formułowania wniosków o charakterze ogólnym. Uzyskane rezultaty mają zarówno znaczenie poznawcze, jak i potencjał aplikacyjny w obszarze technologii żywności, nutraceutyków oraz biomateriałów.

Stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Tetiany Dyrdy-Terniuk spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym

i nauce oraz wnoszę do Rady Dyscypliny Nauki Chemiczne o dopuszczenie Kandydatki do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora. Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy, bardzo dobry dorobek publikacyjny obejmujący pięć prac stanowiących podstawę rozprawy oraz dodatkową publikację naukową, a także szeroki zakres zastosowanych metod badawczych i duży potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników, zwracam się również do Rady Dyscypliny z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Tetiany Dyrdy-Terniuk.

Z wyrazami szacunku

Artur Krężel



Signed by / Podpisano
przez:

Profesor Artur Krężel
Uniwersytet
Wrocławski

Date / Data: 2026-10-
26 04:58