

[w nagłówku pierwszej strony logo Wydziału Chemii UŁ oraz logo UNIC, w stopce każdej następnej dane teleadresowe Recenzenta]]

Łódź, dnia 18.07.2025 r.

Dr hab. Łukasz Półtorak, prof. UŁ

Lider zespołu Electrochemistry@Soft Interfaces

Katedra Chemii Nieorganicznej i Analitycznej

Zakład Elektroanalizy i Elektrochemii

Wydział Chemii, Uniwersytet Łódzki

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Bogusz

Tytuł: „*Functionalized organic coatings as bioelectronic interfaces*”

[*Funkcjonalizowane pokrycia organiczne jako interfejsy bioelektroniczne*]

pod kierunkiem dr hab. Katarzyny Krukiewicz, prof. PŚ

Ogólny opis rozprawy doktorskiej: Rozprawa doktorska zaprezentowana przez mgr inż. Małgorzatę Bogusz przedstawia imponującą i kompleksową eksplorację rozwoju przewodzących modyfikacji powierzchni za pomocą pokryć organicznych, zaprojektowanych jako bioelektroniczne interfejsy o właściwościach antybakteryjnych i biokompatybilnych. Badania dotyczą fundamentalnego badania PEDOT i PEDOP (z lub bez cząstek metalicznych), wraz z procesem modyfikacji elektrody opartym na solach diazoniowych oraz interakcji powstałego systemu z modelowymi kulturami komórkowymi. Praca wyróżnia się integracją wielu technik modyfikacji powierzchni, przede wszystkim elektrochemicznej polimeryzacji

[koniec strony 1 z 7]

PEDOT i PEDOP, elektrochemicznego szczepienia soli diazoniowych i elektrochemicznego osadzania cząstek metalicznych, w celu tworzenia nanoskalowych monowarstw organicznych o możliwych do dostosowania właściwościach powierzchni. Na niniejszą rozprawę doktorską należy zwrócić uwagę nie tylko ze względu na jej fundamentalny wkład w dziedzinę modyfikacji i charakteryzacji powierzchni, ale także ze względu na jej istotne implikacje praktyczne ukierunkowane na rozwój biointerfejsów. Wszystkie zaprezentowane wyniki zostały już opublikowane w siedmiu (!) recenzowanych czasopismach, w tym ACS Applied Materials & Interfaces, Electrochimica Acta, Bioelectrochemistry, Electrochemistry Communications, Advanced Electronic Materials and Polymers.

Struktura pracy doktorskiej: Rozprawa doktorska oferuje zwięzły przegląd najważniejszych informacji bezpośrednio związanych z siedmioma opublikowanymi oryginalnymi artykułami badawczymi, które stanowią główną część rozprawy. Po wstępie czytelnik znajdzie rozdział zatytułowany „Hipoteza i cele badawcze”, który skutecznie podsumowuje nadrzędny cel pracy Pani mgr inż. Bogusz. W szczególności, sześć celów badawczych nakreśla pełną wyzwań i angażującą propozycję badawczą, wykazując zarówno ambicje naukowe, jak i innowacyjność. Część metodologiczna zawiera szczegółowe opisy, które są bezpośrednio powiązane z opublikowanymi badaniami, co jest bardzo wygodne i znacznie ułatwia proces czytania. Ten wyraźny związek pomiędzy procedurami eksperymentalnymi a opublikowanymi wynikami podkreśla rygor i spójność podejścia badawczego. Wreszcie, Pani mgr inż. Bogusz przedstawia istotę wygenerowanej wiedzy w sekcji „Wyniki i dyskusja”, po której następuje

obszerny przegląd literatury obejmujący 102 odniesienia, w tym prace seminaryjne i najnowsze publikacje bezpośrednio związane z tematem. Rozprawę uzupełnia również imponująca lista osiągnięć i siedem załączników, z których każdy reprezentuje opublikowaną pracę naukową (od A1 do A7) wraz z powiązanymi elektronicznymi plikami pomocniczymi. Ogólnie rzecz biorąc, niniejsza rozprawa jest przykładem dobrze skonstruowanej i naukowo rygorystycznej pracy. Chociaż zidentyfikowano kilka błędów ortograficznych, uważam je za drobne mankamenty, które nie wpływają znacząco na czytelność lub ogólną poprawność prezentowanej pracy.

[koniec strony 2 z 7]

Podsumowanie prac A1-A7:

A1: W niniejszej pracy Pani mgr inż. Magdalena Bogusz badała wpływ elektrochemicznego domieszkowania na powierzchnię i właściwości elektrochemiczne przewodzącego polimeru - PEDOT, w celu zwiększenia jego wydajności jako interfejsu bioelektronicznego. Systematycznie modulując właściwości fizykochemiczne warstw PEDOT poprzez domieszkowanie różnymi jonami (PSS , ClO_4^- i PF_6^-) stwierdzono, że te dwa ostatnie zapewniają pokryciom lepszą wydajność pod względem pojemności elektrochemicznej i biokompatybilności.

A2: Zestaw danych uzyskanych w tej pracy pokazuje, że strategia modyfikacji powierzchni PEDOT poprzez osadzanie cząstek złota i srebra tworzy wielofunkcyjny interfejs o zwiększonej zwilżalności, chropowatości i właściwościach adhezji komórek z zachowanymi właściwościami antybakteryjnymi.

A3: W mojej ocenie wyniki przedstawione w pracy A3 stanowią najbardziej znaczące osiągnięcie Pani mgr inż. Magdaleny Bogusz. Wprowadzenie Nafionu jako przeciwjonu dla PEDOT, w połączeniu z przewodzącą modyfikacją powierzchni poprzez zastosowanie metody drop-castingu, doprowadziło do powstania elektrod o znacznie ulepszonych właściwościach superkondensacyjnych i doskonałej wydajności. Te postępy zostały osiągnięte poprzez zastąpienie powszechnie stosowanego PSS przez Nafion jako przeciwjon PEDOT i włączenie prostego etapu obróbki rozpuszczalnikiem organicznym.

A4: W niniejszej pracy opisano syntezę i charakterystykę dwuwarstwowego kompozytu PEDOT/PEDOP utworzonego poprzez sekwencyjną elektropolimeryzację, co skutkuje znacznie lepszymi właściwościami pojemnościowymi i elektrochemicznymi do zastosowań w superkondensatorach (w porównaniu z monowarstwami lub dwuwarstwami PEDOP/PEDOT). Kompozyt wykazuje wysoką pojemność powierzchniową, niską rezystancję transferu ładunku i zwiększoną chropowatość powierzchni przypisywaną nanostrukturom powierzchniowym, co podkreśla jego potencjał jako wysokowydajnego materiału do magazynowania energii.

A5: Niniejsze badanie demonstrowało jednoetapową technikę szczepienia elektrochemicznego z wykorzystaniem dostępnych na rynku soli diazoniowych do modyfikacji elektrod platynowych, co skutkuje poprawą stabilności mechanicznej i wydajności elektrochemicznej depozytu PEDOT:PSS. Zastosowana wstępna modyfikacja/obróbka elektrochemiczna zwiększyła pojemność magazynowania ładunku, zmniejszyła rezystancję transferu ładunku i zwiększyła pojemność elektryczną, jednocześnie promując lepszą przyczepność pokrycia.

[koniec strony 3 z 7]

A6: Kluczowe osiągnięcie przedstawione w tym badaniu wynika ze szczepienia elektrochemicznego mieszaniny soli diazoniowych, tworzącego pokrycie organiczne o znacznym zmniejszeniu (84%) przyczepności bakterii bez uszczerbku dla żywotności komórek, oferując tym samym obiecujące podejście do wytwarzania pokryć antybakteryjnych na wszczepialnych urządzeniach biomedycznych.

A7: W ostatniej pracy Pani mgr inż. Małgorzata Bogusz zastosowała elegancką modyfikację powierzchni, będącą kontynuacją wyników opublikowanych w pracach A5 i A6. Tutaj dodatek poli-L-lizyny miał na celu zwiększenie liczby miejsc adhezji komórek, co zostało potwierdzone podczas badania adhezji komórek nerwowych.

Ocena osiągnięcia naukowego Pani mgr inż. Małgorzaty Bogusz: Lista osiągnięć mgr inż. Małgorzaty Bogusz jest naprawdę znakomita. Jest współautorką dwunastu publikacji naukowych, z których siedem stanowi trzon jej rozprawy doktorskiej. Jej prace zostały opublikowane w renomowanych czasopismach z dziedziny elektrochemii - Electrochemical Acta, Bioelectrochemistry, Electrochemistry Communications - oraz w dziedzinie nauk o powierzchniach i interfejsach, w szczególności w czasopiśmie o wyjątkowo dobrej reputacji - ACS Applied Materials & Interfaces. Jako główny autor siedmiu publikacji oznaczonych jako A1 - A7, wyraźnie wykazała swoją wiodącą rolę w tworzeniu wiedzy; była pierwszym autorem w czterech i drugim autorem w trzech artykułach. Zgodnie z międzynarodowymi standardami, jej pozycja na liście autorów wskazuje na jej dominujący wkład w badania opisane w opracowaniach.

Dodatkowo, szczegółowy osobisty wkład przedstawiony na stronie 54 pracy doktorskiej nie pozostawia wątpliwości, że jej zaangażowanie było siłą napędową opisanych opracowań. Wyniki swoich badań prezentowała na dziewięciu konferencjach, głównie międzynarodowych, co jest godnym uwagi osiągnięciem. Na szczególną pochwałę zasługują prezentacje ustne, które wygłosiła na dwóch dorocznych spotkaniach International Society of Electrochemistry, ponieważ tylko naukowcy wybrani z dużej puli zarejestrowanych mają przywilej dzielenia się swoimi wynikami w ten sposób.

[koniec strony 4 z 7]

Pomimo wymagającego charakteru prowadzonych badań, pełniła również funkcję wykonawcy w dwóch grantach finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki oraz uczestniczyła w dwóch dodatkowych projektach finansowanych przez Horizon Europe i Narodową Agencję Wymiany Akademickiej. Jej rola jako kierownika projektu wewnętrznego grantu badawczego dodatkowo podkreśla jej zdolność do samodzielnego formułowania i realizacji pomysłów badawczych. W trakcie realizacji pracy doktorskiej odwiedziła również zespoły badawcze w Niemczech, Nowej Zelandii i dwukrotnie USA, przy czym jedna z wizyt została wsparta przyznaniem stypendium wyjazdowym.

Wszystkie te osiągnięcia, uzyskane w stosunkowo krótkim okresie studiów doktoranckich, są znacząco ponadprzeciętne. W mojej ocenie Panią mgr inż. Małgorzatę Bogusz można zaliczyć do grona 10% najlepszych na świecie w jej dziedzinie.

Podsumowanie, pytania i uwagi: Rozprawa doktorska przygotowana przez Panią mgr inż. Magdalenę Bogusz skutecznie podsumowuje jej najważniejsze osiągnięcia, które zostały opublikowane w pracach A1-A7, zamieszczonych jako załączniki. Rozprawa jest dobrze skonstruowana i napisana w sposób jasny, logiczny i przystępny. Moje ogólne wrażenie dotyczące treści naukowych i stylu pisania jest bardzo pozytywne. Mam jednak dwa pytania, do których, mam nadzieję, Pani mgr inż. Magdalena Bogusz odniesie się podczas obrony:

W pracy opublikowanej w Polymers 13 (2021) 1984, Pani Bogusz (Scorupa in 2021) i współautorzy twierdzą, że użycie ClO_4^- i PF_6^- jako przeciwjonów podczas polimeryzacji PEDOT daje depozyty o lepszych właściwościach elektrochemicznych i biokompatybilności w porównaniu do PSS. Jednak wiele późniejszych badań opublikowanych przez Panią Bogusz nadal wykorzystuje PSS jako przeciwjon. Jakie czynniki wpływają na wybór przeciwjonu w takich przypadkach i dlaczego PSS jest nadal często stosowany pomimo zgłaszanych zalet ClO_4^- i PF_6^- ?

[koniec strony 5 z 7]

Ciekawi mnie charakter cząstek srebra w powłoce PEDOT, jak opisano w pracy opublikowanej w Bioelectrochemistry 153 (2023) 108484. Jaki był skład i pH pożywki stosowanej podczas badań biologicznych (antybakteryjnych i cytotoksycznych)? Czy może to wpłynąć na chemię powierzchni cząstek Ag? Czy możliwe jest, że podczas tych testów na powierzchni cząstek Ag tworzą się powłoki Ag_2O lub AgCl ? Czy może to dodatkowo tłumaczyć zachowaną żywotność komórek przy utrzymanych właściwościach antybakteryjnych?

Streszczenie w języku angielskim: Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Bogusz pt. „Functionalized organic coatings as bioelectronic interfaces [Funkcjonalizowane powłoki organiczne jako interfejsy bioelektroniczne]” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.). Wyniki opisane w recenzowanej rozprawie doktorskiej stanowią oryginalne i nowatorskie rozwiązanie podjętego tematu naukowego. Na podstawie treści przedstawionych w rozprawie można stwierdzić, że Pani mgr inż. Magdalena Bogusz posiada ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu nauk chemicznych oraz umiejętności potrzebne do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Ocena recenzowanej pracy: pozytywna.

W związku z powyższym rekomenduję dopuszczenie Pani mgr inż. Magdaleny Bogusz do udziału w publicznej dyskusji nad rozprawą doktorską.

[streszczenie oraz ocena recenzowanej pracy powtórzone w języku polskim]

[koniec strony 6 z 7]

[podpis odręczny]: „Łukasz Półtorak”
Dr hab. Łukasz Półtorak, prof. UŁ

[koniec strony 7 z 7]

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na liście tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem pdf sporządzonym w języku angielskim. Podpisano odręcznie przez autora

mgr Małgorzata Sokołowska

