PODPIS ZAUFANY
KONRAD
RUDNICKI
19.10.2026 15:15:53 GMT+02C
Dokument podpisany elektronicz
podpisem zaufanym

WYDZIAŁ CHEMII
Uniwersytet Łódzki

UNIC

Łódź, dnia 19.10.2026 r.

dr hab. Konrad Rudnicki
Zespół Elektrochemii Granic Cieczowych (E@SI)
Katedra Chemii Nieorganicznej i Analitycznej
Wydział Chemii UŁ
e-mail: konrad.rudnicki@chemia.uni.lodz.pl

POLITECHNIKA GDAŃSKA
BIURO RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
Wpłynęło dnia 19.10.2026
L.dz. 54/2026
Podpis

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Aiswaryi Manohar

zatytułowanej „Engineering Laser-Induced Graphene for Multifunctional Electrochemical Interfaces", będącej podstawą w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynierii materiałowej.

Praca została wykonana w Zakładzie Elektrochemii i Fizykochemii Powierzchni Instytutu Nanotechnologii i Inżynierii Materiałowej na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Jacek Ryl, zaś rolę promotora pomocniczego pełnił dr Mohsen Khodadadi Yazdi.

1. Podstawa prawna

Niniejsza recenzja została przygotowana na wniosek Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Gdańskiej, prof. dr hab. inż. Marii Gazdy z dnia 27.08.2026 roku. Przygotowanie recenzji odbyło się w oparciu o art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2. Wstęp

W dzisiejszych czasach coraz częściej mówi się o elektrochemii jako o nauce przechodzącej od kilku lat „swoisty renesans". Istota istnienia tej dziedziny dla wielu laików może wydawać się mało aplikacyjna, a co za tym idzie, rzadko przydatna – nic bardziej mylnego. W obecnych czasach nieustannie rośnie potrzeba opracowywania zarówno (I) niskokosztowych, szybkich i dokładnych procedur analitycznych, (II) czułych, a zarazem kompaktowych, przenośnych czujników, jak i (III) innowacyjnych, interdyscyplinarnych rozwiązań, które poza nowością naukową dostarczą wartościowej wiedzy o najwyższym znaczeniu społecznym. Ewolucja każdej z dziedzin jest

niemożliwa bez interdyscyplinarnego charakteru realizowanych badań, które prowadzą do wzajemnego przenikania się wielu dyscyplin badawczych. Zjawisko to występuje także w przypadku rozwoju elektrochemii, która łączy ze sobą zarówno nauki chemiczne, inżynierię materiałową, nauki fizyczne, jak i wiele innych.

Nieprzerwanie od wielu lat dużym zainteresowaniem wśród elektrochemików cieszą się materiały na bazie węgla z uwagi na swoje unikalne właściwości fizykochemiczne. Jednym z nich jest indukowany laserowo grafen (LIG), który występuje jako trójwymiarowa wysoce porowata struktura. Jego synteza opiera się na naświetlaniu materiałów węglowych lub polimerowych wiązką promieniowania laserowego, najczęściej przy użyciu lasera CO_2. Materiał ten bardzo dobrze sprawdza się w konstrukcjach czujników i bioczujników elektrochemicznych, które znajdują szereg zastosowań. Najnowsze doniesienia literaturowe opisują zastosowanie sensorów na bazie LIG do badania i oznaczania wielu molekuł o istotnym znaczeniu biologicznym, jak np. glukoza, tyrozyna, kwas moczowy, w różnego typu płynach ustrojowych. Niezwykle ciekawym jest także stosowanie tego typu sensorów w oznaczaniu bakterii czy enzymów.

Recenzowana praca opisuje fabrykację LIG o optymalnych właściwościach oraz modyfikację powierzchni wytworzonego materiału z wykorzystaniem różnych bio- i nanomateriałów. Kandydatka do stopnia doktora przedstawiła także w swojej dysertacji ważne zastosowanie jednego z opracowanych sensorów na bazie LIG w połączeniu z membraną hydrożelową do oznaczania glukozy.

3. Ocena strony formalnej i edytorskiej dysertacji

Recenzowana rozprawa została przygotowana w języku angielskim w formie tradycyjnej monografii. Praca jest estetyczna i przejrzysta, wzbogacona o dużą ilość materiałów graficznych, co zdecydowanie wpływa na jej dobrą lekturę. Obszerny wstęp literaturowy bardzo dobrze wprowadza czytelnika do podjętej przez autorkę tematyki badawczej. Nie zabrakło także listy symboli oraz listy stosowanych skrótów. Pani mgr Manohar, przygotowując dysertację, opierała się na 283 pozycjach literaturowych, co w przypadku rozpraw doktorskich w postaci monograficznej jest jak najbardziej uzasadnione i w pełni wystarczające. Zdecydowana większość odnośników to dobrze dobrane tematycznie artykuły w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej. W tym aspekcie pracę oceniam ***pozytywnie***.

4. Ocena merytoryczna dysertacji

Przedłożona do recenzji praca, w moim odczuciu, bardzo dobrze wpisuje się w dyscyplinę inżynierii materiałowej i ma wyraźny charakter interdyscyplinarny. Wyniki uzyskane w trakcie doktoratu przez mgr. Manohar dotyczą zarówno aspektów chemii materiałowej, elektrochemii, jak i wysoko zaawansowanych technik obrazowania, a także w pewnym stopniu wiążą się z tematyką analityki chemicznej.

Przewodnim celem prowadzonych prac badawczych było wytworzenie LIG, który będzie wykazywał najlepsze właściwości elektrochemiczne jako materiał o wielu potencjalnych zastosowaniach, z naciskiem na fabrykację sensorów elektrochemicznych. Doktorantka zbadała parametry pracy lasera stosowanego w trakcie wytwarzania indukowanego grafenu (m.in. moc i szybkość), które mogą w znaczący sposób wpływać na właściwości wytwarzanego materiału. Uzyskiwany produkt zostawał także poddawany szczegółowej charakterystyce przy użyciu zaawansowanych technik takich jak skaningowa mikroskopia elektronowa, spektroskopia fotoelektronowa, spektroskopia Ramana, goniometria, a także woltamperometria i impedancja. Tak obszerna i dokładna analiza matrycy LIG (przed i po modyfikacji jej powierzchni) znacząco podnosi wartość naukową prowadzonych eksperymentów.

Przeprowadzone badania pokazały wyraźnie, iż podłoże LIG wykazuje bardzo dobre właściwości elektryczne, niemniej jednak wymaga ono zastosowania procedur modyfikacji w celu poprawy pozostałych parametrów, co może doprowadzić do wytworzenia obiecującego materiału elektrodowego. Jako optymalne podłoże do prowadzonych eksperymentów wybrano elektrodę P12%S160, której powierzchnię poddawano modyfikacji materiałami hydrożelowymi. W tym celu doktorantka nanosiła na matryce LIG trzy różne membrany hydrożelowe pochodzenia naturalnego (chitozan, agaroza, alginian sodu). W moim odczuciu bardzo dobrym podejściem było wybranie modyfikatorów należących do innych klas chemicznych, które różnią się obecnością grup funkcyjnych oraz charakterem ładunku elektrycznego. Badania wykazały, iż modyfikacja elektrod LIG hydrożelami spowodowała spadek współczynników dyfuzji substancji elektrodowo czynnych, a najniższą wartość odnotowano w przypadku zastosowania membrany chitozanowej. Dodatkowo bardzo obiecującym wynikiem jest wartość wyliczonej powierzchni elektroaktywnej, która w przypadku modyfikacji hydrożelem chitozanowym wzrosła około 9 razy w porównaniu z niemodyfikowanym LIG. W efekcie bardzo dokładnie scharakteryzowano czujniki na bazie LIG zmodyfikowane trzema różnymi hydrożelami, które mogą posłużyć jako obiecujące narzędzia w elektroanalizie. Wnikliwa analiza eksperymentalna przeprowadzona szeregiem zaawansowanych

technik doprowadziła do wielu interesujących wniosków, szczegółowo omówionych i odpowiednio uargumentowanych w publikacjach naukowych, w których doktorantka jest współautorką.

Z naukowego punktu widzenia najważniejszym etapem badań Doktorantki były eksperymenty związane z enzymatycznym oznaczaniem glukozy przy użyciu LIG modyfikowanego warstwą hydrożelową chitozanu oraz nanostrukturami irydu i platyny, z uwagi na wysoką aplikacyjność opracowanej procedury badawczej wykorzystującej skonstruowany czujnik. Bardzo ważnym osiągnięciem jest antybakteryjny charakter czujnika po modyfikacji, którego dowiedziono eksperymentalnie wobec bakterii *Staphylococcus aureus* (gronkowiec złocisty) oraz *Escherichia coli* (pałeczka okrężnicy). Niezwykle istotny jest także fakt, iż opracowany sensor wykazywał częściową odporność na adsorpcję białek. Dodatkowo doktorantka wraz z zespołem dowiodła, iż warstwa nanozymatyczna (Ir-Pt) zwiększa odpowiedź katalityczną względem nadtlenku wodoru w porównaniu z niemodyfikowanym LIG, a także z elektrodami modyfikowanymi pojedynczymi metalami. W efekcie powodowało to wydajne przetwarzanie sygnału podczas enzymatycznego oznaczania glukozy. Opracowana procedura badawcza w połączeniu ze skonstruowanym sensorem Ir–Pt–CS–GOx@LIG charakteryzowała się liniową odpowiedzią na glukozę w zakresie stężeń 0.01 – 7.5 mM, granicą wykrywalności wynoszącą 8.14 μM oraz stabilnością działania przez 15 dni. Doktorantka przeprowadziła także badania dotyczące określenia selektywności wytworzonego czujnika oraz opracowanej procedury badawczej. W tym celu jako substancje potencjalnie interferujące wybrała: kwas askorbinowy, fruktozę, dopaminę, paracetamol, cysteaminę oraz cysteinę. Uzyskane wyniki pokazały, iż obecność większości potencjalnych interferentów powodowała nieznaczne zmiany sygnału rejestrowanego dla glukozy. Dodatkowo badania przeprowadzono dla dwóch różnych wartości potencjałów, a w efekcie postawiono wniosek, iż przy potencjale 0.3 V *vs.* Ag/AgCl w sposób skuteczny zminimalizowały się uboczne procesy utlenienia, co doprowadziło do znacznej poprawy selektywności. Aplikacyjność opracowanego sensora została sprawdzona w próbce sztucznego potu. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość zastosowania opracowanego biosensora do oznaczania glukozy w tego typu matrycy, wskazując na jego potencjał w analizie próbek o złożonym składzie. Zaobserwowane obniżenie czułości w porównaniu z pomiarami w buforze PBS podkreśla jednak istotny wpływ warunków środowiskowych, w szczególności pH i składu matrycy, na parametry analityczne czujnika. Uzyskane wyniki wskazują zatem na potrzebę dalszej optymalizacji sensora w celu zapewnienia wiarygodnych oznaczeń glukozy w rzeczywistych próbkach biologicznych.

Jako recenzent chciałbym zwrócić uwagę na fakt, iż doktorantka zawarła w rozprawie także rozdział przedstawiający dalsze perspektywy badań. Uważam to za bardzo istotne. Pani mgr Manohar

słusznie stwierdziła, iż przeprowadzone badania wstępne pokazują potencjał poszerzania technologii wytwarzania LIG poza tradycyjnie stosowane podłoża. Analiza możliwości wykorzystania celulozy i politetrafluoroetylenu jako alternatywnych prekursorów oraz transferu struktur LIG na elastyczne podłoża hydrożelowe z wykorzystaniem diakrylanu poli(glikolu etylenowego) wyznaczają nowe kierunki rozwoju tej technologii. Badania te podkreślają znaczenie rodzaju i właściwości chemicznych podłoża, parametrów obróbki laserowej oraz metod transferu dla kształtowania struktury i właściwości otrzymywanych materiałów. Pomimo wstępnego charakteru przeprowadzonych analiz, uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszej optymalizacji procesów wytwarzania i wskazują na możliwości zwiększenia wszechstronności oraz zakresu zastosowań materiałów węglowych otrzymywanych metodą laserową. Od strony merytorycznej dysertację oceniam zdecydowanie ***pozytywnie***.

5. Uwagi oraz aspekty wymagające dyskusji

Podczas lektury niniejszej rozprawy nasunęło mi się kilka uwag i pytań, które mają zdecydowanie charakter dyskusyjny i w najmniejszym stopniu nie wpływają one na moją ocenę pracy oraz jej ***pozytywny*** odbiór. Podczas obrony chciałbym poprosić Doktorantkę o ustosunkowanie się do nich:

- Rolą recenzenta jest nie tylko ocena jakości dysertacji oraz przeprowadzonych w ramach jej powstania badań, ale także wkładu Kandydatki/Kandydata do stopnia doktora w pozostałą działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną. W pracy zabrakło mi zestawienia osiągnięć Doktorantki, które, patrząc na jakość opisanych w rozprawie badań, są z pewnością bogate. Podczas obrony proszę o przedstawienie ich Komisji jako część prezentacji.
- Podczas czytania artykułu „Electrochemical Glucose Sensing at a Multifunctional Hydrogel-Modified Laser-Induced Graphene Interface" opublikowanego w czasopiśmie *Small Structures*, który przedstawia wyniki będące częścią tej dysertacji natknąłem się na pewną nieścisłość. W abstrakcie Autorzy podali, iż sensor Ir–Pt–CoP–GOx@LIG wykazuje liniowość dla wzrastających stężeń glukozy w zakresie 0.5 – 10 mM podczas gdy w podrozdziale 2.5 znajduje się informacja, że zakres ten to 0.5 – 7.5 mM. Rozumiem, że mogło to być przeoczenie. Proszę o komentarz.
- Czym podyktowany był wybór potencjalnych substancji interferujących w trakcie badań związanych z oznaczaniem glukozy?
- Czemu Doktorantka zdecydowała się na oznaczenie glukozy w próbce sztucznego, a nie prawdziwego potu? Czy rozważane były inne matryce takie jak np. krew?

- Dlaczego do modyfikacji elektrody na bazie LIG wybrano akurat takie metale jak iryd i platyna? Czy Doktorantka brała pod uwagę lub być może testowała inne metale?
- Czy użyteczność opracowanego sensora do enzymatycznego oznaczania glukozy była także sprawdzana dla innego analitu o wysokim znaczeniu biologicznym?

6. Wnioski końcowe

Z pełnym przekonaniem uznaję, iż przedstawiona mi do recenzji dysertacja doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane takim pracom, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz została przedstawiona w formie przewidzianej w art. 187 ust. 3 tej ustawy. Podsumowując, pracę tę w każdym aspekcie oceniam ***pozytywnie***. Jednocześnie zwracam się do Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Gdańskiej, prof. dr hab. inż. Marii Gazdy o dopuszczenie mgr Aiswaryi Manohar do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora *w* dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynierii materiałowej.

Ponadto, po przeanalizowaniu wytycznych dotyczących wyróżniania prac przedstawionych w Uchwale Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Gdańskiej o numerze 2/2020 z dnia 20 stycznia 2020 roku wnoszę do Przewodniczącej wyżej wspomnianego organu o wyróżnienie dysertacji doktorskiej mgr Aiswaryi Manohar. Wniosek swój argumentuję wybitnym poziomem naukowym przeprowadzonych badań związanych z opracowaniem selektywnej platformy elektrochemicznej do enzymatycznego oznaczania glukozy, które zostały opublikowane w artykule „Electrochemical Glucose Sensing at a Multifunctional Hydrogel-Modified Laser-Induced Graphene Interface". W publikacji naukowej, która przedstawia w/w. badania Doktorantka jest pierwszym autorem. Mój wniosek z pewnością uzasadnia fakt, iż praca ta ukazała się w renomowanym periodyku Small Structures z listy filadelfijskiej, który należy do wydawnictwa Wiley i opisany jest współczynnikiem oddziaływania IF = 8.9.

Rudnicki Konrad

.....

dr hab. Konrad Rudnicki