



WYDZIAŁ  
CHEMII

Uniwersytet Łódzki

Łódź, dn. 29 września 2025 r.

dr hab. Ireneusz Piwoński, prof. UŁ  
Katedra Technologii i Chemii Materiałów  
Wydział Chemii, Uniwersytet Łódzki

### RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Piotrowskiego pt.:

**„Development of the Fricke Radiochromic Gel Dosimeter for Radiotherapy Dosimetry Applications  
- Rozwój dozymetru radiochromowego Fricke do zastosowań w dozymetrii w radioterapii”**

wykonanej pod kierunkiem Promotora, Pana prof. dr hab. inż. Marka Kozickiego,  
zrealizowanej w Katedrze Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów  
Polimerowych, na Wydziale Włókiennictwa i Wzornictwa Politechniki Łódzkiej.

#### Ocena wyboru tematyki badań

Odkrycie promieni X przez Wilhelm'a Conrad'a Röntgen'a w 1895 r. oraz właściwości promieniotwórczych radu przez Marię Skłodowską-Curie i Piotra Curie w 1898 r. stanowiły przełomowe wydarzenia w historii nauki. Praktyczne od samego początku zaczęto je wykorzystywać do prześwietlania ludzkiego ciała, zaś w okresie późniejszymi stosować także do leczenia nowotworów. Obecnie, współczesna radiologia w medycynie to szerokie spektrum metod służących do obrazowania ciała, takich jak RTG, tomografia komputerowa czy USG, służące do precyzyjnego diagnozowania i leczenia chorób (radiologia zabiegowa). W obu przypadkach niezwykle istotne jest określenie dawki promieniowania oraz jej lokalizacja. Z tego względu rozwój metod pozwalających na zmierzenie podawanej dawki promieniowania oraz miejsca jej usytuowania są niezwykle istotne. Kluczową rolę w pomiarze poziomu promieniowania jonizującego w różnych dziedzinach, np. w radioterapii, ale także w przemyśle nuklearnym, diagnostyce medycznej oraz w monitoringu środowiska odgrywają różnego rodzaju dozymetry. Do konwencjonalnych dozymetrów opartych na zmianach fizycznych i chemicznych wywołanych promieniowaniem należą dozymetry termoluminescencyjne i dozymetry z optycznie stymulowaną luminescencją. Aby sprostać rygorystycznym wymaganiom nowoczesnych zastosowań, rośnie również zapotrzebowanie na zaawansowane dozymetry chemiczne, charakteryzujące się wysoką czułością, precyzją i niezawodnością.



Tematyka recenzowanej pracy dotyczy opracowania metod wytwarzania oraz charakterystyki szeregu chemicznych dozymetrów żelowych w postaci kapsułek, dozymetrów dwu- i trójwymiarowych. W badaniach optymalizowano skład chemiczny dozymetrów, wpływający na efektywność monitorowania dawki naświetlania z uwzględnieniem ich właściwości mechanicznych, termicznych i stabilności chemicznej. Głównym ich składnikiem jest układ wykorzystujący utlenianie jonów  $\text{Fe}^{2+}$  do  $\text{Fe}^{3+}$  w wyniku działania promieniowania jonizującego w kwaśnym roztworze wodnym, znanym pod nazwą dozymetru chemicznego Fricke'a. Służy on do pomiaru dawki pochłoniętej w wodzie i stanowi standard do określenia wielkości dawek promieniowania jonizującego. Obszar badań zaprezentowany w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Piotrowskiego wpisuje się w szereg aktualnych trendów badawczych. Stąd też, celem pracy było określenie właściwości fizykochemicznych różnych dozymetrów, a zwłaszcza optymalizacji ich składu chemicznego w powiązaniu z procedurą obrazowania. Podjęta przez Doktoranta tematyka pracy jest zatem bardzo aktualna ze względu na potencjalne zastosowania opracowanych dozymetrów w medycynie.

### Ocena merytoryczna dysertacji

Recenzowana praca doktorska została zredagowana w jęz. angielskim, w klasycznej formie i stanowi dysertację liczącą 152 strony. Układ pracy obejmuje wstęp, określenie celu pracy, część literaturową, część doświadczalną (materiały i metody), opis wyników z dyskusją oraz wnioski. Bibliografia liczy 196 pozycji literaturowych. Do pracy załączono także dorobek naukowy Doktoranta liczący dwie publikacje z czasopism z listy JCR związane z tematyką badawczą, w których Doktorant jest pierwszym Autorem, dwie kolejne publikacje wysłane do czasopism (w chwili sporządzania recenzji przyjęte już do druku) oraz trzy inne publikacje. Doktorant uczestniczył również w trzech konferencjach naukowych. Osiągnięcia te wymieniam, jednak z zaznaczeniem, że nie stanowią one przedmiotu oceny niniejszej dysertacji. Mimo, że praca zredagowana jest w jęz. obcym to jej odbiór na płaszczyźnie językowej jest zrozumiały.

Część literaturową otwiera opis zastosowania radioterapii w leczeniu chorób nowotworowych, ze zwróceniem uwagi na wpływ promieniowania jonizującego na komórki oraz możliwe efekty uboczne. Po krótkim opisie różnych dozymetrów stosowanych w radioterapii następuje bardzo dobrze opisany zasadniczy dozymetr będący obiektem prac – dozymetr Fricke'a, oparty na wspomnianych reakcjach utleniania jonów żelaza  $\text{Fe}^{2+}$  do  $\text{Fe}^{3+}$ . Szczegółowo opisano ten dozymetr ze zwróceniem uwagi na czynniki fizyczne i chemiczne, które mogą wpływać na mierzone wartości promieniowania. Reakcje wyjaśniające ten proces wraz z opisem są przedstawione poprawnie. Autor zwraca uwagę na pewne wady dozymetru Fricke'a – tj. zbyt wysoki próg detekcji dawki w porównaniu do dawek stosowanych w radioterapii. Sugeruje możliwość zmiany składu roztworu, poprzez dodanie kwasu mrówkowego lub benzooesowego w celu obniżenia progu detekcji do około 0,52 Gy. Nie podejmuje jednak tego wątku w badaniach, wybierając inne rozwiązania.

Na tym tle pojawia się również koncepcja dozymetrów trójwymiarowych, pozwalających na obrazowanie rozkładu dawki promieniowania w trzech wymiarach. Doktorant przedstawia propozycję dozymetru żelowego, opartego na szeregu substancji żelujących (np. żelatyna, agaroz, alkohol poliwinylowy, Pluronic F-127 itp.). Autor zwraca też uwagę na problem dyfuzji jonów i potrzebę prowadzenia pomiarów zaraz po naświetlaniu.



Ponieważ nie zawsze jest to możliwe, pojawia się koncepcja zastosowania dodatkowych substancji spowalniających dyfuzję z jednoczesnym obniżeniem progu czułości układu. Z przedstawionego w części literaturowej opisu zarysowuje się cel badawczy, polegający na wytworzeniu stabilnego dozymetru o optymalnym składzie, umożliwiającego pomiar zakładanych dawek promieniowania oraz jego rozkładu w przestrzeni trójwymiarowej (dozymetry 3D). Szkoda, że w tej części Autor nie przedstawił podsumowania i nie podjął próby sformułowania głównego problemu badawczego w postaci hipotezy. Być może lepszym rozwiązaniem byłoby przedstawienie celu i zakresu pracy po analizie piśmiennictwa. Stanowiłby on bowiem odpowiedź Doktoranta na problemy naszkicowane w części literaturowej. Niemniej, cele i zakres pracy są bardzo ambitne, obszerne i zostały sformułowane w postaci dziesięciopunktowej listy, będącej kamieniami milowymi dysertacji.

Część eksperymentalna - rozdział „Materiały i metody” przygotowana jest na bardzo dobrym poziomie. Otwiera ją opis preparatyki różnego rodzaju dozymetrów żelowych (makrokapsułki, nano-, mikro- żele, dozymetry 1D, 3D) oraz metody wykorzystane do charakterystyki tych żeli. To co stanowić mogłoby uzupełnienie tej części dysertacji, to podanie jasno sprecyzowanych kryteriów na podstawie których Doktorant wybrał takie, a nie inne substancje i układy badawcze. Dużą część zajmuje opis przygotowania dozymetrów 2D, ze szczególnym uwzględnieniem opisu badań termicznych, mechanicznych i stabilności chemicznej. Dla wszystkich rodzajów zastosowanych dozymetrów skrupulatnie opisana jest procedura ich napromieniania. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku żeli 2D zastosowano innowacyjną technikę - optyczną tomografię komputerową (*ang. optical computed tomography - OCT*). Wybór tej techniki uważam za bardzo trafny i nieodzowny z uwagi na potrzebę monitorowania precyzyjnego dostarczania, wysoce ukierunkowanej dawki promieniowania do tkanki nowotworowej, zaś minimalnej dawki do zdrowej tkanki sąsiadującej z guzem. Użycie zatem techniki OCT do weryfikacji dostarczanej dawki w radioterapii, umożliwiającej pomiar dawki i gęstości optycznej za pomocą trójwymiarowego (3D) dozymetru radiochromowego uważam za bardzo celowe. Jest to istotne zwłaszcza z uwagi na wysoce aplikacyjny charakter badanych dozymetrów, pozwalających na dokładną lokalizację i intensywność dostarczanej wiązki do tkanek pacjenta. Uzupełnieniem opisów są zdjęcia ilustrujące przeprowadzane eksperymenty.

Rozdział „Wyniki i dyskusja” otwiera opis badań pokazujących stabilność roztworów żelaza w różnych warunkach. Autor nieźle wskazuje, że czystość wody ma fundamentalne znaczenie w ich przygotowaniu. Trwałe roztwory można otrzymać tylko w wodzie podwójnie destylowanej. Następnie, Autor bada stabilność roztworów poszczególnych składników oraz oddziaływania pomiędzy nimi stosując pomiary prądu przepływowego (*ang. streaming current measurements*). Na wykresach zamieszczonych w rozdziale 5.1.2 można zauważyć, że dla jonów  $\text{Ca}^{2+}$  oraz  $\text{Fe}^{2+}$  z alginianem mierzony potencjał staje się mniej negatywny. Autor używa jednak terminu prąd „...in consequence the streaming current values increase” - np. rozdział 5.1.2 str. 57. Czy chodzi tu faktycznie o prąd czy raczej o potencjał? Na osiach jednostką jest [mV]. Powstaje też pytanie, jak można wytłumaczyć bardzo duże różnice w wartościach potencjału dla poszczególnych składników oraz czy stała wartość potencjału wskazuje na trwałość danego roztworu? Proszę o wyjaśnienie.

Bardzo ciekawym i atrakcyjnie wizualnie fragmentem pracy są badania i charakterystyka kapsułek, badania ich napromieniowania oraz uwalniania jonów żelaza i wapnia z kapsułek. Wydaje się, że głównym problemem, w przypadku tego typu dozymetrów, jest ich kurczenie się oraz szybkie uwalnianie zawartości ( tj. jonów wapnia, żelaza oraz oranżu ksylenolowego) w stosunkowo krótkim czasie. Czy Autor widzi możliwość ograniczenia tych zjawisk, obok proponowanych modyfikacji



alkoholem poliwinylowym lub związków na bazie silikonów, w celu użycia kapsulek jako dozymetrów 1D?

Z kolei badania nano- i mikro- żeli sugerują, że mamy do czynienia z układami o rozmiarach nano- oraz mikro- badanymi oddzielnie. Tymczasem wydaje się, że Autor używa obu terminów łącznie. Pomiar DLS wskazuje na największą wartość średnicy hydrodynamicznej sięgającej około 130 nm - rys. 34 B, str. 68. Mimo, że rozmiar przekracza umowne 100 nm to, klasyfikowałbym uzyskany układ koloidalny raczej jako nanometrowy. Czy może dostępne są inne wyniki, które wskazują na rozmiar cząstek w rozmiarze mikro? Proszę o wyjaśnienie.

W rozdziale 5.2.4 str. 79 - 89 oraz rys. 42 - 50, Autor stosuje termin jednostka monitorująca (MU - monitor units), podczas gdy w innych miejscach np. w podrozdziale 5.2.4.4 „Kalibracja dozymetrów” stosowana jest już jednostka dawki pochłoniętej Gy (Grej). Czy jednostki te są tożsame? Jakie jest ich wzajemne powiązanie? Proszę o wyjaśnienie.

W moim odczuciu najbardziej zaawansowane badania przedstawione zostały w rozdziałach 5.2.4.4 oraz 5.3.1 dotyczące kalibracji dozymetrów, a także badania rozkładu wiązki promieniowania w trzech wymiarach. Porównano w nich otrzymane wyniki z danymi uzyskanymi na podstawie symulacji komputerowych. Pozwoliło to na skonstruowanie dozymetrów, które mogą być zastosowane w badaniach *in vivo* do pomiarów dawki promieniowania np. na skórze.

Przedstawiona do recenzji praca jest bardzo obszerna. Zakres pracy, tj. dobór materiałów, parametrów i technik pomiarowych jest bardzo rozległy. Z tego powodu uważam, że klarowniejsze przedstawienie najważniejszych tez, płynących z uzyskanych wyników, byłoby jej niewątpliwym atutem. Celowe byłoby też zbiorcze przedstawienie najważniejszych wyników w postaci tabel, (np. tak jak w tabeli 8 na str. 102) lub w postaci zestawień graficznych stanowiących syntetyczną wizualizację końcowych wyników badań. Trudno bowiem doszukiwać się w tekście jaki jest próg czułości danego typu dozymetru, jaki jest zakres stosowalności (liniowość w określonym przedziale dawek), jaka jest maksymalna dawka, którą może dany dozymetr zaabsorbować w powiązaniu ze składem i właściwościami fizykochemicznymi dozymetru (dyfuzja, trwałość itp.). Ponadto, Autor operuje wieloma symbolami i skrótami, które są trudne do rozszyfrowania podczas wstępnej lektury pracy. Wykaz skrótów i symboli w tego typu dysertacjach jest nieodzowny.

Struktura pracy w pełni spełnia wymagania redakcyjne oraz merytoryczne stawiane dysertacjom. Cele pracy są jasno sformułowane, zaś wnioski w części końcowej stanowią zwięzłe podsumowanie pracy. Zabrakło natomiast wyraźnego wyeksponowania tezy lub hipotezy badawczej. Należy podkreślić wysokie znaczenie poznawcze i aplikacyjne przeprowadzonych badań. Podsumowując stwierdzam, że część eksperymentalna pracy w mojej opinii jest bardzo dobrze opracowana.

Mimo przedstawionych krytycznych komentarzy odbiór pracy jest zdecydowanie pozytywny. Zawiera ona wiele cennych i nowatorskich wyników badań uzyskanych z zastosowaniem aparatury wysokiej jakości, w tym aparatury diagnostycznej stosowanej w laboratoriach medycznych. Badania te uważam za potrzebne, ważne i wnoszące wiele cennych informacji do obszaru wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej i radiologii z uwagi na wysoce aplikacyjny charakter badań.



## Wnioski końcowe

Stwierdzam, że przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej treści prezentują teoretyczną i praktyczną wiedzę doktoranta niezbędną do ubiegania się o nadanie stopnia doktora. Wyrazem tego są dobrze zaplanowane badania, właściwe przeprowadzenie przeglądu literaturowego oraz odpowiedni wybór technik i metod badawczych. Ponadto, zaprezentowane wyniki wskazują, że Doktorant wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej tj. planowania, obserwacji i właściwego wyciągania wniosków. Rozprawa doktorska stanowi także oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, co ilustrują otrzymane wyniki badań własnych.

Podsumowując, wysoko oceniam dokonania Doktoranta oraz jakość pracy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Piotrowskiego pod tytułem „*Development of the Fricke Radiochromic Gel Dosimeter for Radiotherapy Dosimetry Applications - Rozwój dozymetru radiochromowego Fricke do zastosowań w dozymetrii w radioterapii*” zrealizowanej pod opieką Promotora Pana prof. dr hab. inż. Marka Kozickiego. W recenzowanej pracy Doktorant dowiódł swojej szerokiej wiedzy teoretycznej i praktycznej w dyscyplinie inżynieria materiałowa. W oparciu o właściwie dobrany zakres metod badawczych, poprawnie sformułował i finalnie rozwiązał oryginalny problem naukowy. Uzyskane wyniki badań zostały właściwie opracowane, zinterpretowane i opisane. Przedstawione w recenzji uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie wpływają negatywnie na zdecydowanie dobrą ocenę osiągnięcia naukowego Doktoranta.

W związku z powyższym stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2022, poz. 574) i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Piotrowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.



Dr hab. Ireneusz Piwoński

