

Łódź, dn. 21.01.2025 r.

Dr hab. inż. Dorota Bociąga, prof. Politechniki Łódzkiej  
Zakład Inżynierii Biomedycznej i Materiałów Funkcjonalnych  
Instytut Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź, Polska

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Autor rozprawy: mgr inż. Mohammad Ali Haghighat Bayan**

**Tytuł rozprawy: „Stimuli-Responsive Polymer Nanomaterials for Biomedical Applications”**

Promotor: dr hab. Filippo Pierini

Promotor pomocniczy: dr Paweł Nakielski

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie powołania przez Radę Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

## 1. UWAGI OGÓLNE O TEMATYCE ROZPRAWY

---

### 1.1. Znaczenie problematyki podjętej w recenzowanej rozprawie

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „*Stimuli-Responsive Polymer Nanomaterials for Biomedical Applications*” podejmuje temat rozwoju i zastosowania polimerowych nanomateriałów reagujących na bodźce w zaawansowanych zastosowaniach biomedycznych, skupiając się głównie na wytwarzaniu elektroprzędzonych nanowłókien, które zmieniają swoje właściwości pod wpływem zewnętrznych lub wewnętrznych bodźców. Co do aplikacyjnego zakresu wykorzystania tych nanowłókien mgr inż. Mohammad Ali Haghighat Bayan skupił się na dwóch obszarach – eliminacja patogenów (uzyskanie właściwości antybakteryjnych głównie dla maseczek ochronnych) oraz inteligentne systemy dostarczania leków.

Stosowanie maseczek ochronnych na twarz zawsze było podstawą standardowych praktyk bezpieczeństwa dla pracowników narażonych na stałe cząstki lotne i pracowników służby zdrowia. Jest to również typowa metoda ochrony w przypadku wysokich stężeń zanieczyszczeń w powietrzu. Epidemia choroby koronawirusowej (COVID-19) pokazała, że poza dystansem społecznym i zakazem dużych zgromadzeń, noszenie odpowiednich maseczek na twarz pozostawało najskuteczniejszą strategią ochrony ludzi przed wdychaniem materii wirusowej i następczym zakażeniem. Noszenie maseczek stało się więc elementem codziennego życia dla znaczącej części populacji. W konsekwencji rosnącego zapotrzebowania produkcja maseczek znacznie wzrosła w ciągu ostatnich kilku lat a ich masowe zużycie powoduje ogromną ilość odpadów.

Skuteczność maseczki wynika z jej zdolności filtracji oraz wytrzymałości mechanicznej. Jej bezpieczeństwo środowiskowe może być spełnione poprzez zaprojektowanie membran produkowanych z bezpiecznych dla środowiska polimerów. Wiele prac naukowych ukierunkowanych jest na strategię recyklingu maseczek jednorazowego użytku. Chociaż zaleca się opracowanie masek na bazie polimerów nadających się do recyklingu, częściowo biodegradowalne polimery są niebezpieczne dla środowiska, co potwierdza szerokie rozprzestrzenienie się mikrocząstek polimerowych w całym ekosystemie. Biorąc pod uwagę środowisko, należałoby zrezygnować z polimerów biostabilnych na rzecz polimerów biodegradowalnych do produkcji mediów filtracyjnych. O ile jednak włókna naturalne mają lepszą biokompatybilność, to włókna syntetyczne mają lepsze właściwości mechaniczne, co jest również ważne w przypadku nanowłókiennych membran do zastosowań filtracyjnych, ponieważ wymagają one, aby materiały były zginane we wszystkich kierunkach i to wielokrotnie.

Inną strategią na rozwiązanie tego problemu, w kierunku której nakierowana została praca doktorska mgr inż. Mohammada Ali Haghighat Bayana, jest oparcie się na idei, że redukcja odpadów jest możliwa dzięki wprowadzeniu rozwiązań mających na celu poprawę wydajności maseczek ochronnych w określonych zastosowaniach, przy jednoczesnym wydłużeniu ich żywotności. Możliwość odkażania struktury maski ochronnej bez zmniejszania

wydajności i stabilności filtra daje możliwość rozwoju długoterminowych, wielokrotnego użytku i bezpiecznych środków ochrony osobistej. Doktorant skupił się na opracowaniu włóknistych membran o cechach, które mogą być stale aktywne lub uruchamiane na żądanie.

Intensywnie prowadzone badania naukowe w zakresie rozwoju innowacyjnych włóknistych materiałów filtracyjnych doprowadziły do powstania wielu innowacyjnych technologii na przestrzeni ostatnich lat. Opracowano techniki, dzięki którym możliwe jest wytwarzanie nanometrycznych włókien polimerowych o wysokim stosunku powierzchni do objętości, wysokiej porowatości, wyjątkowych właściwościach mechanicznych i stabilności, takich jak technika elektroprzędzenia. Dodatkowo, jest to technika, która zapewnia możliwość włączania dodatkowych materiałów do wytwarzanych struktur nanowłóknistych. Stawać się one mogą materiałami „inteligentnymi” reagującymi na bodźce wyzwalające ich odpowiednie właściwości a mogą być nimi ultradźwięki, światło, siła mechaniczna, temperatura, pole elektryczne lub magnetyczne, lokalna zmiana pH. Specyficzne właściwości różnych polimerów elektroprzędzalnych umożliwiają produkcję pasywnych filtrów o szczególnych możliwościach, takich jak kontrolowane rozpraszanie ciepła i monitorowanie oddychania. Maseczki nowej generacji mogą zapewnić więcej korzyści ze względu na fakt, że włączane do nich inne składniki pozwalają na uzyskanie aktywnej filtracji roboczej. Ten typ separacji cząstek można podzielić na dwie klasy. W pierwszej klasie stosuje się funkcjonalne nanowłókna, w związku z tym nie ma potrzeby dodatkowej zewnętrznej interwencji w celu wymuszenia ich określonego działania, ale wykonywana aktywność jest ciągła, niespecyficzna i nie można jej wyzwać na żądanie. W drugiej klasie filtrów ich aktywacja następuje na żądanie, tj. pod wpływem bodźca zewnętrznego.

Inteligentne maski na twarz przyniosą korzyści całemu społeczeństwu, zapewniając odpowiednią ochronę przed zanieczyszczeniami i patogenami, jednocześnie obniżając koszty ponoszone do tej pory na zakup produktów jednorazowego użytku. Ponadto rozwój tych systemów będzie miał również znaczący wpływ na środowisko, ponieważ mogą być biodegradowalne i nie trzeba ich często wymieniać. Mając na uwadze te aspekty podkreślić należy, że badania przeprowadzone przez mgra inż. Mohammada Ali Haghighat Bayana wpisują się bardzo mocno w obecne potrzeby z zakresu możliwości wytwarzania produktów ochrony osobistej znacznie skuteczniejszych i bardziej przyjaznych środowisku.

## 1.2. Cel rozprawy i jej zakres

W niniejszej rozprawie Doktorant wskazał, że **celem jego badań było zaprojektowanie zaawansowanych elektroprzędzonych nanowłókien o wielofunkcyjnych właściwościach do zastosowań biomedycznych**, skupiających się na zwiększonej ochronie i dostarczaniu terapii na żądanie. Na realizację tego celu złożyły się pomniejsze cele kluczowe obejmujące następujące prace:

- 1) wytworzenie maseczek ochronnych z użyciem elektroprzędzonych nanowłókien polimerowych (w tym również takich, do których wprowadzono plazmoneczne nanocząstki (nanopręciki złota – Au NRs – z *ang.* *Au nanorods*) w celu uzyskania ich właściwości fototermicznych i fotodynamicznych oraz zieleń indocyjaninową (ICG – z *ang.* *Indocyanine Green*), aby wytworzyć maseczki antybakteryjne);
- 2) wytworzenie nanowłókien o strukturze rdzeń-powłoka domieszkowanych fotoaktywnymi plazmonecznymi nanopręcikami ze złota przeznaczonymi do stosowania jako nośniki leków;
- 3) przebadanie podłoży z wytworzonych nanowłókien pod kątem ich morfologii, struktury, zdolności do zwilżania powierzchni oraz innych właściwości fizykochemicznych i mechanicznych;
- 4) ocena właściwości funkcjonalnych co do zdolności zwalczania patogenów i uzyskania właściwości antybakteryjnych dla maseczek na skutek aktywacji światłem bliskiej podczerwieni lub promieniowania słonecznego modyfikowanych nanowłókien, z których zostały wytworzone;
- 5) wytworzenie nanowłókien o strukturze rdzeń-powłoka aktywowanych światłem bliskiej podczerwieni (NIR) i badania weryfikujące uzyskanie dla nich efektu kontrolowanego i trwałego uwalniania leków.

Doktorant wskazuje trzy główne zakresy, w jakich opracowane przez niego nanowłókna niosą korzyści, czyniąc ich aplikacje obszarem innowacji, mianowicie:

- 1) poprawa właściwości użytkowych maseczek ochronnych poprzez zastosowanie technik elektroprzędzenia oraz elektrorozpylania,
- 2) rozwój nośniki leków reagujących na światło,
- 3) połączenie właściwości przeciwwirusowych, przeciwbakteryjnych i rozpraszania ciepła a tym samym uzyskanie wielofunkcyjnych maseczek ochronnych.

## **2. FORMALNA STRONA ROZPRAWY**

---

### **2.1. Struktura rozprawy i wykorzystana literatura**

Recenzowana rozprawa liczyła pierwotnie 165 stron (po zmianach zgłoszonych 10.01.2025 r. liczba ta zmieniła się do 114), z czego pierwsze 44 strony (potem 42) to wstęp do tematyki pracy oraz opis będący podsumowaniem artykułów wchodzących w jej skład. Pracę stanowił pierwotnie zbiór pięciu publikacji wskazanych przez Doktoranta w rozdziale 8-1 rozprawy zatytułowanym „*Publications Included in the Cycle of the Dissertations*”, które zostały podsumowane w rozdziale 8-2 „*Summary of the Publications Included in the Publication Cycle of the Dissertation*”. W efekcie zmian zgłoszonych w dniu 10.01.2025 roku przez Przewodniczącego Komisji Doktorskiej, pozycja nr 2 została ostatecznie usunięta z cyklu.

1. Anna Zakrzewska, **Mohammad Ali Haghighat Bayan**, Paweł Nakielski, Francesca Petronella, Luciano De Sio, and Filippo Pierini. "*Nanotechnology transition roadmap toward multifunctional stimuli-responsive face masks*" ACS Applied Materials & Interfaces (2022): 46123-46144.
2. **Mohammad Ali Haghighat Bayan**, Anna Zakrzewska, Seyed Shahrooz Zargarian, Paweł Nakielski, and Filippo Pierini. "*Design and Fabrication of Electrospun Nanofiber-Based Face Masks*" (in press). Part of: Mitchell, Geoffrey R., Electrosin: principles, practice and possibilities. Royal Society of Chemistry, London (na podstawie zmian zgłoszonych 10.01.2025 r. ta pozycja została ostatecznie usunięta z wykazu).
3. **Mohammad Ali Haghighat Bayan**, Yasmin Juliane Dias, Chiara Rinoldi, Paweł Nakielski, Daniel Rybak, Yen B. Truong, Alexander L. Yarin, and Filippo Pierini. "*Near-infrared light activated core- shell electrospun nanofibers decorated with photoactive plasmonic nanoparticles for on-demand smart drug delivery applications*" Journal of Polymer Science 61, no. 7 (2023): 521-533.
4. **Mohammad Ali Haghighat Bayan**, Chiara Rinoldi, Daniel Rybak, Seyed Shahrooz Zargarian, Anna Zakrzewska, Olga Cegielska, Kaisa Põhako-Palu, Shichao Zhang, Agata Stobnicka-Kupiec, Rafał L Górny, Paweł Nakielski, Karin Kogermann, Luciano De Sio, Bin Ding, and Filippo Pierini. "*Engineering surgical face masks with photothermal and photodynamic plasmonic nanostructures for enhancing filtration and on-demand pathogen eradication*" Biomaterials Science 12, no. 4 (2024): 949-963.
5. **Mohammad Ali Haghighat Bayan**, Chiara Rinoldi, Alicja Kosik-Kozioł, Magdalena Bartolewska, Daniel Rybak, Seyed Shahrooz Zargarian, Syed Ahmed Shah, Zuzanna J. Krysiak, Shichao Zhang, Massimiliano Lanzi, Paweł Nakielski, Bin Ding, and Filippo Pierini. "*Solar-to- NIR Light Activable PHBV/ICG Nanofiber-Based Face Masks with On-Demand Combined Photothermal and Photodynamic Antibacterial Properties*" Advanced Materials Technologies: 2400450.

Powyższe prace w wersjach oryginalnych i w całości zostały włączone do pracy jako rozdział 11. W trzech z nich (po usunięciu z wykazu pozycji nr 2) mgr inż. Mohammad Ali Haghighat Bayan jest pierwszym autorem. Co do publikacji pod pozycją pierwszą Doktorant wskazał w pracy (strona 26), że wkład pracy w jej opracowanie był taki sam zarówno ze strony pierwszej Autorki – Pani Anny Zakrzewskiej, jak i jego. Zakres prac wykonanych przez mgra inż. Mohammada Ali Haghighat Bayana do każdej z tych publikacji został wskazany w oświadczeniach współautorów zebranych w podrozdziale 12. W wykazie publikacji przedstawionym na stronie 25 zostały one ponumerowane od 1 do 5 (po zmianach – od 1 do

4). W rozdziale 11 nie nadano im numeracji a kolejność ich zamieszczenia nie jest zgodna z numeracją z wykazu na stronie 25. Stąd też zapewne powstały rozbieżności we wskazaniach, co do numeru publikacji, do której odnosi się oświadczenie co do artykułów 2, 3 i 4 (wg powyżej przytoczonej numeracji). Mając jednak na uwadze, że w każdym oświadczeniu jest zapisany tytuł i autorzy publikacji, można jednoznacznie określić, której publikacji ono dotyczy. Niemniej jednak w przyszłości, dla kolejnych tego typu prac warto, aby Doktorant zachował spójność dla wykazów, które czyni w ramach danego opracowania.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim. Wskazane powyżej artykuły stanowią trzon rozprawy (przytoczono je w wersjach oryginalnych w rozdziale 11) a poprzedzone są jednostronicowym streszczeniem w języku angielskim oraz swego rodzaju przewodnikiem po tematyce i zakresie pracy, na który składa się dziesięć rozdziałów (przy czym zauważyć należy, że rozdział 9 „Conclusions” (strona 35) został pominięty w spisie treści na stronie 5, podobnie, jak podrozdział 2-2 „Applications of Electrospun Nanofibers”). Rozdziały 1-6 stanowią opisy: dotyczące metody elektroprzędzenia (rozdział 1), materiałów zdolnych do reakcji na bodźce (rozdział 2) w rozdziale na opisy zjawisk, które tymi procesami rządzą (podrozdział 2-1) oraz zastosowań w tym zakresie elektroprzędzonych nanowłókien (podrozdział 2-2). W rozdziale 3. „Background on Face Masks and the Pandemic” oraz 4. „Nanotechnology in Personal Protective Equipment” Doktorant przytacza argumenty, które stanowią o zasadności podjętych przez niego badań. Rozdział 5 to wprowadzenie w tematykę procesów elektroprzędzenia pozwalających na uzyskiwanie systemów dostarczania leków. Opisy te zostały rozdzielone tematycznie na metody wprowadzania leków do włókien (podrozdział 5-1) oraz możliwości zastosowania struktur nanowłókien typu rdzeń-powłoka w systemach dostarczania leków (podrozdział 5-2). Rozdział 6 dotyczy inteligentnych systemów dostarczania leków i jest niejako wstępem do rozdziału 7, w którym jest opisany nadrzędny cel badań i opis prac składających się na jego realizację. Rozdział 9 „Conclusions” stanowi podsumowanie całości rozprawy ze wskazaniem na osiągnięcia, co do możliwości aplikacyjnych uzyskanych rezultatów. Rozdział 10 to spis przytoczonej literatury, gdzie zdecydowana jej większość pochodzi z ostatniego dziesięciolecia i są to głównie publikacje ze znaczących czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym. Literatura przytoczona do opisu stanowiącego przewodnik-podsumowanie liczy 92 pozycje. Publikacje zostały dobrane trafnie i poprawnie przypisane względem omawianych zagadnień. Całość pracy kończy rozdział 12, który zawiera oświadczenia współautorów publikacji stanowiących cykl przedstawiany jako rozprawa doktorska.

## **2.2. Język i formalna strona rozprawy**

Praca stosuje się do podstawowych zasad typografii. Zawiera 12 rysunków (przed wycofaniem jednej publikacji z wykazu było ich 13) nie licząc tych, które są przytoczone w oryginałach publikacji składających się na osiągnięcie naukowe – te mają swoją każdorazowo

niezależną numerację stron, rysunków, tabel i odnośników literaturowych. Język pracy jest właściwy dla opracowań naukowych. Opisy są zwięzłe a potwierdzenie faktów znajduje swoje odzwierciedlenie w dobrze dobranych pozycjach literaturowych. Pewną niedogodność w czytaniu budzi rozdział 1, jako że Doktorant odnosi się tutaj do tych samych zjawisk, faktów i choć w poszczególnych akapitach wprowadza nieco odmienne sformułowania, to nadal faktem pozostaje, że to samo opisywane jest dwukrotnie (akapit drugi opisuje to samo, co zostało ujęte w akapicie pierwszym, łącznie z tym, że dla obu akapitów przytoczone są te same odnośniki literaturowe [1-6]). Dużym atutem pracy jest fakt, że Doktorant wprowadził własne rysunki, szkoda natomiast, że przytaczając zdjęcie 7 pozostawił nieopisane oznaczenia (A) i (B). Brak ten jest niwelowany na stronie 30, gdyż tutaj raz jeszcze wprowadzony jest ten sam rysunek z pozycji [15] – występuje on zatem w pracy 2 razy – raz jako nr 7 a następnie jako nr 10 (przez zmianą był to Rys. 11).

Edycja czterech wskazanych publikacji, ich poprawność językowa i zakres, nie podlegają ocenie recenzentki z racji faktu, że są to pozycje opublikowane w recenzowanych czasopismach.

### 3. OCENA MERYTORYCZNA

---

W recenzowanej rozprawie doktorskiej pt. „*Stimuli-Responsive Polymer Nanomaterials for Biomedical Applications*” uznać można, iż na **analizę stanu wiedzy** w obszarze zagadnień objętych pracą składają się trzy elementy: 1) opisy ujęte w rozdziałach 1-6, 2) publikacja przeglądowa pt. „*Nanotechnology transition roadmap toward multifunctional stimuli-responsive face masks*”, która wskazuje na motywację do podjęcia tematyki pracy i stanowi solidną podstawę do sformułowania celu rozprawy i przeprowadzonych badań, 3) wstęp w każdej z pozostałych publikacji z wykazu, jako że do każdej z nich wykonywany był bieżący przegląd literatury.

Za wstępną **analizę literatury** dla recenzowanej pracy doktorskiej jako całości uznać można publikację przeglądową pt. „*Nanotechnology transition roadmap toward multifunctional stimuli-responsive face masks*”, poprzez którą wykazano motywację do podjęcia tematyki pracy i która stanowiła dobrą podstawę do sformułowania celu rozprawy i kolejno prowadzonych badań. Przegląd przedstawia rys historyczny maseczek, od początków ich stosowania sięgających okresu „Black Death” po najnowsze rozwiązania w postaci respiratorów.

W drugiej części pracy zaprezentowano obszerny przegląd literatury na temat rozwoju pasywnych, aktywnych i reagujących na bodźce mediów elektroprzewodzenia do produkcji maseczek na twarz. Ponadto przedstawiono w niej przegląd badań przeprowadzonych nad filtrami nanowłóknistymi uzyskanymi metodą elektroprzewodzenia. Podkreślono postępujący rozwój kolejnej generacji masek na twarz, których unikalne właściwości mogą być aktywowane w odpowiedzi na określony bodziec zewnętrzny. Dzięki dodatkowym składnikom

wbudowanym w strukturę włókna filtry mogą na przykład nabywać właściwości antybakteryjne lub przeciwwirusowe, samosterylizować strukturę i magazynować energię generowaną przez użytkowników. Przegląd kończy się dyskusją na temat wytycznych dotyczących najskuteczniejszych ścieżek opracowywania nowej generacji maseczek o zupełnie nowych, unikalnych możliwościach.

**Za część eksperymentalną** niniejszej rozprawy uznać należy artykuły badawcze (ostatecznie w ilości trzech) wskazane w rozprawie w wykazie na stronie 25 i przytoczone w oryginałach w rozdziale 11.

Publikacja pt. *„Near-infrared light-activated Core-Shell Electrospun Nanofibers Decorated With Photoactive Plasmonic Nanoparticles for On-Demand Smart Drug Delivery Applications”* dotyczy tematyki systemów dostarczania leków na żądanie poprzez aktywowanie światłem bliskiej podczerwieni elektroprzędzonych nanowłókien o budowie rdzeniowo-powłokowej zawierających fotoaktywne plazmoneczne nanocząstki. Doktorant wykorzystał nanopręciki złota (NRs Au – z ang. *nonorods Au*) aby uzyskać tzw. inteligentne systemy dostarczania leków umożliwiające uwalnianie leków na żądanie i zapobiegających gwałtownemu uwalnianiu i wysokim stężeniom leków. Do wytwarzania nanowłókien zastosowano współosiowy układ elektroprzędzenia i technikę elektrorozpylania. Rdzeń PVA-rodamina B (RhB) miał zapewnić hydrofilowość a powłoka PLGA ochronę hydrofobową. Włączenie NR Au umożliwiło znaczną generację ciepła w świetle NIR, ułatwiając kontrolowane i ciągłe uwalnianie leku. Doktorant podsumowuje tę pracę wnioskiem, że fotoreaktywne nanowłókna PVA-PLGA zawierające Au NR są bardzo obiecujące jako nośniki leków na żądanie, łącząc skuteczne dostarczanie leków odpowiadające na bodźce z dobrą biokompatybilnością i stabilnością strukturalną.

Kolejną pracą cyklu jest publikacja pt. *„Engineering Surgical Face Masks with Photothermal and Photodynamic Plasmonic Nanostructures for Enhancing Filtration and On-Demand Pathogen Eradication”*. Dotyczy ona badań nad ulepszaniem maseczek chirurgicznych poprzez wbudowywanie nanopręcików złota (NR Au) pomiędzy warstwy elektroprzędzonych polimerowych nanowłókien poliakrylonitrylu (PAN). Ekspozycja tak wytworzonych wkładów filtracyjnych na światło NIR ma zdolność do generowania ciepła mogącego zabijać bakterie i wirusy na powierzchni maseczki, co znacznie zwiększa skuteczność filtracji maski w przypadku cząstek i bakterii bez zwiększania spadku ciśnienia, zapewniając oddychalność i komfort. W pracy tej Doktorant wskazuje, że możliwe jest tworzenie wielofunkcyjnych, wielokrotnego użytku masek na twarz o ulepszonych możliwościach ochronnych i korzyściach dla środowiska.

Ostatnią pracą składającą się na cykl publikacji przedstawianych jako rozprawa doktorska jest artykuł pt. *„Solar-to-NIR Light Activable PHBV/ICG Nanofiber-Based Face Masks with On-Demand Combined Photothermal and Photodynamic Antibacterial Properties”*. Badania w nim prowadzone skupiają się na uzyskaniu inaktywacji bakterii zarówno pod wpływem promieniowania bliskiej podczerwieni, jak i promieniowania słonecznego. Pod tym kątem wytworzono (metodą elektroprzędzenia) i badano nanowłókna z PHBV (poli(3-



hydroksymaślan-ko-3-hydroksywalerian)) zintegrowane z zielenią indocyjaninową (ICG). Efekt fototermiczny, ułatwiony przez zdolność materiału do przekształcania światła w ciepło, wzmacniał jego właściwości przeciwbakteryjne. W pracy tej Doktorant prowadził badania mając na celu udowodnienie, że zaproponowane rozwiązanie materiałowe pozwala na tworzenie biokompatybilnego i przyjaznego dla środowiska rozwiązania.

Podsumowując – część eksperymentalna składająca się z trzech publikacji stanowi pewien spójny ciąg badawczy. Prace te skupiają się na opracowaniu efektywnego „systemu” uzyskiwanego dzięki technice elektroprzędzenia poprzez wprowadzanie odpowiednich substancji do nanowłókien lub poprzez ich napylenie. W kolejnych publikacjach analizowane są różne materiały (polimery, z których następuje elektroprzędzenie) oraz ich właściwości pod kątem możliwości uzyskania filtrów zamieszczonych w maseczkach ochronnych zdolnych do filtracji bakterii i wirusów. Ponadto, w poszczególnych publikacjach analizowane są również dodatki substancji i nanocząstek do elektroprzędzonych matryc, które dają możliwość uruchamiania procesów uwalniania aktywnie działających substancji pod wpływem zadanego bodźca. Choć prace z cyklu stanowią odrębne opracowania, mają pewne części wspólne i potencjał do zaproponowania spójnego rozwiązania aplikacyjnego.

Do tej części rozprawy mam następujące pytania:

- 1) Na jakiej podstawie dokonywano wskazania składu polimerów, z których elektroprzędzono oraz ilości osadzanych nanoprecinków złota?
- 2) Zaproponowane rozwiązanie stworzenia materiału typu „core-shell” z napyłonymi nanoprecinkami złota, które wspomagają procesy inicjujące i podtrzymujące zjawisko uwalniania substancji z rdzenia materiału, wydają się być bardzo obiecujące. W jakim stopniu możliwe jest uzyskanie równomierności rozproszczenia nanoprecinków Au na powierzchni hydrofobowej osłonki wykonanej z PLGA i jaki wpływ ma to rozłożenie na uzyskiwane efekty sukcesywnego uwalniania substancji z wnętrza?
- 3) Dla elektroprzędzonych nanowłókien mających strukturę „core-shell”, gdzie na hydrofobową powłokę zewnętrzną (shell) wykonaną z PLGA nanoszono nanoprecinki złota (Au NRs), badania w kontakcie z komórkami fibroblastów przeprowadzono jedynie dla materiałów PVA i PVA+PLGA? Czy i jaki wpływ na warunki eksperymentalne i uzyskiwaną odpowiedź biologiczną mogłyby mieć naniesione nanocząstki złota?
- 4) Dlaczego w publikacji pt. *„Engineering Surgical Face Masks with Photothermal and Photodynamic Plasmonic Nanostructures for Enhancing Filtration and On-Demand Pathogen Eradication”* do badania odpowiedzi biologicznej zastosowano linię komórek BHK-21 (z ang. *Baby Hamster Kidney cells*)? W jaki sposób ten model odzwierciedla opisywane potencjalne aplikacje maseczek ochronnych?

- 5) Czy i jaki wpływ na elektroprzędzone nanowłókna poliakrylonitrylu (PAN), osadzone na zewnętrznej warstwie maski chirurgicznej, będzie miało wielokrotne naświetlanie NIR stosowane w celu uzyskania efektu sterylizacyjnego (eliminacji bakterii)? Czy procesy te będą miały wpływ na żywotność maseczek i ich właściwości użytkowe?
- 6) Jak Doktorant ocenia ekonomiczność wytwarzania maseczek pokrytych zaproponowanymi przez niego warstwami elektroprzędzonymi z PAN dekorowanymi Au NRs w stosunku do kosztu wytwarzania i utylizacji maseczek jednorazowych?
- 7) W publikacjach przedstawionych jako cykl składający się na rozprawę doktorską, Doktorant zaproponował różne materiały, z zastosowaniem których przeprowadził procesy elektroprzędzenia. Celem było wytworzenie włókien reagujących na bodźce, skupiając się przede wszystkim na ich wykorzystaniu w maseczkach ochronnych na twarz, oferujących możliwość inaktywacji bakterii na żądanie. Materiały te każdorazowo oceniano niezależnie (odrębne badania opisane w poszczególnych publikacjach) stosując niekiedy odmienne techniki badawcze i różne modele komórkowe (L929, BHK-21), jak również odmienne bakterie (*Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), *Escherichia coli* (*E. coli*)) do badania skuteczności działania przeciwdrobnoustrojowego. Mając na uwadze, że Doktorantowi przyświecał jeden cel pracy, proszę o wskazanie wraz z uzasadnieniem, które spośród wszystkich zaproponowanych i przebadanych rozwiązań jest w uznaniu Doktoranta najbardziej skuteczne i najrozsądniejsze pod kątem ekonomicznym.

**Podsumowując powyższą część recenzji, stwierdzam, że uwagi i pytania w niej zawarte wynikają z ciekawości natury naukowej i w żaden sposób nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę rozprawy jako całości.**

#### **4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSKI KOŃCOWE**

---

Kompleksowe podejście, jakie przedstawił mgr inż. Mohammad Ali Haghighat Bayan, poczynawszy od określenia problemu badawczego (popartego realnymi potrzebami ochrony ludzi i środowiska) poprzez sformułowanie zadań eksperymentalnych, aż po ich realizację z zastosowaniem odpowiednio dobranych technik, **świadczą o jego dojrzałości badawczej i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Przedstawiona rozprawa wykazuje, że **Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną i dorobkiem** w dyscyplinie **inżynieria materiałowa.**

Publikacje, wskazane jako cykl stanowiący pracę doktorską Pana mgr inż. Mohammada Ali Haghighat Bayana pt. **„Stimuli-Responsive Polymer Nanomaterials for Biomedical Applications”** opisują oryginalne rozwiązania z zakresu projektowania i zastosowania polimerowych nanomateriałów reagujących na bodźce, podkreślając ich

potencjał w podnoszeniu jakości masek ochronnych i inteligentnych systemów dostarczania leków. Opisane rozwiązania i otrzymane wyniki przyczyniają się do rozwoju inżynierii materiałowej oraz otwierają drogę do przyszłych badań i rozwoju rozwiązań biomedycznych opartych na nanotechnologii.

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji **rozprawa doktorska pt. „Stimuli-Responsive Polymer Nanomaterials for Biomedical Applications”** spełnia wymagania 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.) oraz **mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa**. Biorąc powyższe pod uwagę **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mohammada Ali Haghighat Bayana do publicznej obrony.**

