

Prof. dr hab. Jacek Ulański
Katedra Fizyki Molekularnej
Politechnika Łódzka
90-924 Łódź
ul. Żeromskiego 116

Łódź, 10. 06. 2025

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Tatiany Nowickiej pt.

**„Opracowanie technologii wytwarzania na skalę przemysłową drukowanych czujnika lub grupy czujników na podłożach elastycznych do bezprzewodowego monitorowania wybranych parametrów fizycznych mających zastosowanie w internecie rzeczy (IoT)”,
wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.**

Pani mgr inż. Tatiany Nowickiej ubiega się o uzyskanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Promotorem recenzowanej rozprawy jest prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska z Politechniki Warszawskiej, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Jarosław Szusta, profesor Politechniki Białostockiej. Badania zostały przeprowadzone we współpracy z przedsiębiorstwem Masterpress S.A. z Białegostoku.

Cel pracy został jasno określony w rozdziale 3. *Cel i zakres pracy* – mgr Tatiana Nowicka chciała, aby wynikiem jej badań było opracowanie technologii wytwarzania sensorów wilgotności z wykorzystaniem technik druku przemysłowego. Wybór takiej tematyki i celu badań w ramach doktoratu został dobrze uzasadniony krytycznym przeglądem stanu wiedzy i techniki w tym zakresie. Spis literatury liczy 221 pozycji i obejmuje poza publikacjami naukowymi także patenty oraz specyfikacje techniczne materiałów i urządzeń i wykazuje, że Doktorantka jest zapoznana z aktualnym stanem badań. Zwrócę jednak uwagę na niejednorodny styl prezentowania poszczególnych pozycji tego spisu; pozytywnym aspektem jest podawanie (ale niestety nie zawsze) tytułów cytowanych prac, jednak w wielu przypadkach brakuje podstawowych danych, nawet takich jak autor czy nazwa czasopisma. Mało staranne opracowanie spisu

literatury uwidacznia się np. też w podwójnym podaniu tych samych pozycji: [176] i [184]. Ponadto seryjne cytowania wielu pozycji (nawet dziewięciu, p. str. 17) bez wskazywania jakich różnych aspektów danego problemu one dotyczą, zmniejsza przydatność przeglądu literatury dla przyszłych czytelników. Nie zmienia to faktu, że Doktorantka wykazała że zaplanowane przez nią badania dotyczą bardzo aktualnej tematyki, a uzyskane wyniki powinny uzupełnić istotną lukę w stanie techniki elektroniki drukowanej. Stwierdzam zatem, że tematyka doktoratu jest aktualna i ważna, co nie jest zaskakujące, bo pod opieką Pani prof. Małgorzaty Jakubowskiej zawsze realizowano badania na wysokim poziomie naukowym i wpisujące się w bieżące trendy.

Układ rozprawy doktorskiej jest klasyczny; po wstępie, w którym Doktorantka wykazała ważność i aktualność badań realizowanych w ramach doktoratu, przedstawione są podstawowe informacje dotyczące fleksografii i drukowanych sensorów wilgotności. Warto podkreślić, że ten zwięzły przegląd literatury jest następnie uzupełniany przy analizie wyników badań własnych w kolejnych rozdziałach rozprawy, gdyż Doktorantka systematycznie odwołuje się do prac innych autorów.

Następnie mgr Nowicka przedstawia nam kolejne etapy systematycznych badań nad opracowaniem technologii przemysłowego drukowania sensorów wilgotności. To jest oczywiście najważniejsza część rozprawy doktorskiej. W mojej recenzji nie będę opisywał metod badań stosowanych przez Doktorantkę i uzyskanych wyników, lecz będę starał się wskazać jakie osiągnięcia uważam za najważniejsze, a także będę stawiał pytania, jeśli uznam że brakuje jakiś informacji, lub gdy interpretacja wyników budzi moje wątpliwości.

Najobszerniejszym rozdziałem opisującym wyniki badań własnych jest rozdział 4. *Opracowanie technologii druku warstw przewodzących*. Mgr Nowicka przeprowadziła badania dostępnych komercyjnie farb przewodzących oraz podłoży do druku. Wysoko oceniam wszechstronność tych badań i wnikliwość analizy wyników, mam jednak kilka pytań:

1. Dlaczego w specyfikacji atramentów przewodzących Autorka nie podaje jaka jest wyrażona w procentach objętościowa zawartość fazy przewodzącej w matrycy polimerowej po jej zestaleniu. W teorii perkolacji to jest najważniejszy parametr pozwalający ocenić czy dany układ jest poniżej czy powyżej progu perkolacji.

Podawanie zawartości wagowej jest do takich rozważań bezużyteczne i powinno być podane tylko na końcu przy opisie receptury przygotowania atramentu. Oczekuję, że w prezentacji na obronie doktoratu Pani Nowicka poda dla wszystkich badanych atramentów objętościową zawartość fazy przewodzącej w matrycy polimerowej po jej zestaleniu, tzn. po odparowaniu rozpuszczalnika lub po utwardzeniu promieniowaniem UV.

2. Jak wyznaczano odchylenie szerokości drukowanych ścieżek? Domyślam się, że korzystano z gotowego oprogramowania, ale to powinno być podane, a ponadto Doktorantka powinna znać i opisać podstawy matematyczne tej metody.

3. Dlaczego w opisie wyników nie są podawane systematycznie grubości drukowanych ścieżek? Ten parametr ma przecież bardzo istotny wpływ na podstawowe właściwości fizyczne ścieżek, elektryczne i mechaniczne. Oczekuję, że w prezentacji przygotowanej na obronę, te informacje zostaną uzupełnione.

4. Cennych wyników dostarczyły testy zginania polegające na badaniu przewodności elektrycznej przed i po zginaniu, ale z punktu widzenia aplikacyjnego równie ważne jest zbadanie przewodności w czasie zginania – czy były podjęte próby wykonania takich pomiarów?

5. Mam kłopoty w zrozumieniu argumentacji Autorki przedstawionej w podrozdziale 4.2.3 (str. 67). Pojawiła się tu informacja, że grubość warstw przewodzących nie przekracza 10 μm , ale Autorka twierdzi, że grubość nie ma wpływu na ocenę rezystancji ścieżek, co oczywiście nie jest prawdą. Zresztą sama Autorka na następnej stronie stwierdza, że przewodność ścieżek zależy od ilości zaaplikowanej farby przewodzącej, co przecież przekłada się na grubość drukowanej warstwy.

Nie rozumiem też do czego ma służyć Rys. 4.11 (str. 68) i towarzysząca temu argumentacja; przecież to wszystko jest zawarte we wzorze (4) na str. 67. Notabene pod tym wzorem Autorka napisała, cytując: „... każdy dowolnego rozmiaru kwadrat ...o stałej grubości... ma tę samą rezystancję”, więc wie że grubość ma wpływ.

6. Na str. 69 Autorka tłumaczy dlaczego przewodząca farba UV nie nadaje się do druku fleksograficznego tym, że po nałożeniu i utwardzeniu jednej warstwy cząstki srebra pozostają zawieszone w matrycy i nie kontaktują się ze sobą. Gdyby tak było, to nałożenie kolejnych warstw nic by nie pomogło, bo w tych warstwach cząstki srebra

też byłyby rozdzielone. Takie błędne wyjaśnienie Autorka powtarza też w podsumowaniu na str. 74, gdzie porównując farby UV z farbami rozpuszczalnikowymi nie bierze pod uwagę różnicy w zawartości cząstek przewodzących w zestalonych matrycach polimerowych (wyrażonej w ułamku objętości), bo ta decyduje o utworzeniu się ścieżek przewodzących, a nie zawartość w roztworze.

Zwracam przy okazji uwagę, że w fizyce oraz chemii określenia cząstka i cząsteczka mają różne znaczenia – cząsteczka jest grupą atomów połączonych wiązaniami chemicznymi, zatem płatki srebra są cząstkami, a nie cząsteczkami.

Bardzo wysoko oceniam opracowanie oryginalnej receptury farby przewodzącej i wnikliwe zbadanie jej właściwości, opisane w podrozdziale 4.3. Jest to w mojej opinii najcenniejsze osiągnięcie Doktorantki, które jest przedmiotem patentu i publikacji. Jednak patent i publikacja są wieloautorskie i Pani Tatiana Nowicka nie jest w nich pierwszym autorem, zatem oczekuję, że w prezentacji na obronie pracy doktorskiej Doktorantka wyjaśni jaki był jej wkład w powstanie patentu i publikacji.

Pozytywnie oceniam fakt poświęcenia dużej uwagi opracowaniu technologii druku warstwy dielektrycznej jako izolatora, gdyż często ten element układów elektronicznych, pozornie bierny, jest traktowany jako mniej ważny. W rozdziale 5. rozprawy Autorka wykazała, że w opracowanych przez nią sensorach wilgotności do wytworzenie warstwy izolującej można użyć [REDACTED]. Jednak opisane na str. 100 sprawdzenie zdolności izolacyjnych tych warstw z użyciem multimetru nie pozwala na stwierdzenie, że takie warstwy mogą być powszechnie używane jako izolatory, także w układach, gdy stosowane są wyższe napięcia. To prowadzi do kolejnego pytania:

7. Czy dla warstw stosowanych jako izolatory wyznaczono charakterystyki prądowo-napięciowe i określono jakie są prądy upływu oraz przy jakim natężeniu pola elektrycznego następuje przebicie, szczególnie w atmosferze o wysokim stopniu wilgotności?

Rozdział 6 poświęcony jest opracowaniu technologii druku najważniejszego elementu czujnika wilgotności, czyli warstwy sensorycznej. Doktorantka postanowiła sprawdzić, czy można wykorzystać do fleksograficznej techniki druku [REDACTED]

██████████ i przeprowadziła szereg testów drukowania na różne podłoża na podstawie których do dalszych badań wybrała dwie ██████████. Warto podkreślić, że mgr Nowicka sprawdzała, czy testowane farby nadają się do fleksograficznej techniki druku zarówno z wykorzystaniem maszyny laboratoryjnej jak i przemysłowej.

Kolejnym etapem było opracowanie technologii druku czujnika wilgotności, co jest opisane w rozdziale 7. Doktorantka bardzo wnikliwie i wszechstronnie zbadała wpływ ██████████ ██████████, co oceniam bardzo wysoko. Jednak mam kilka pytań dotyczących tego rozdziału.

8. Jakie były wymiary sensorów których projekty są pokazane na Rys. 7.1 oraz 7.7? Jaka była szerokość ścieżek przewodzących, a także szerokość i długość kanału pomiędzy ścieżkami?
9. Proszę o wyjaśnienie różnic czułości sensorów z różną grubością warstwy sensorycznej, bo argumenty przedstawione na str. 115 nie są dla mnie przekonujące.
10. Jaka była histereza i powtarzalność czujników z warstwą sensoryczną zawierającą dodatki adsorpcyjne? Czy te czujniki były jednorazowego użytku?
11. Wniosek nr 6 na str. 131 jest w mojej opinii sprzeczny ze wzorem (4) na str. 67, proszę o wyjaśnienie tego punktu.

Bardzo wysoko oceniam wyniki prac przedstawionych w rozdziale 8, mające na celu opracowanie układu do bezprzewodowego pomiaru wilgotności oraz w rozdziale 9, w którym Doktorantka opisuje badania nad przeniesieniem metody druku sensorów wilgotności z warunków laboratoryjnych do przemysłowych. To są bardzo ambitne i trudne zadania i Pani Tatiana Nowicka wykazała że jest to możliwe, co udokumentowała sporządzając karty technologiczne produktu. Można więc uznać, że projekt badawczy, którego cel jest określony w tytule rozprawy doktorskiej: „Opracowanie technologii wytwarzania na skalę przemysłową drukowanych czujnika lub grupy czujników na podłożach elastycznych do bezprzewodowego monitorowania wybranych parametrów fizycznych mających zastosowanie w internecie rzeczy (IoT)” został z sukcesem zrealizowany.

Podsumowanie oceny recenzowanej pracy doktorskiej rozpocznę od wskazania dwóch najważniejszych elementów nowości, stanowiących oryginalny dorobek mgr Nowickiej:

a) opracowanie receptury nowej farby przewodzącej nadającej się do fleksograficznej techniki druku;

b) opracowanie pełnej metodologii wytwarzania czujników wilgotności z wykorzystaniem fleksograficznej techniki druku: od projektu, poprzez dobór materiałów i testy laboratoryjne i opracowanie konstrukcji bezprzewodowego pomiaru wilgotności do testów z wykorzystaniem przemysłowej fleksograficznej linii produkcyjnej. O wartości aplikacyjnej tego osiągnięcia świadczy fakt objęcia rozprawy doktorskiej tajemnicą przedsiębiorstwa Masterpress S.A. z Białegostoku z którym mgr Tatiana Nowicka ściśle współpracowała przy realizacji badań.

Pragnę podkreślić, że zawarte w recenzji uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny, dotyczą głównie interpretacji niektórych wyników i nie mają wpływu na moją wysoką ocenę wyników badań aplikacyjnych opisanych w recenzowanej pracy doktorskiej. Stwierdzam, że rozprawa doktorska pani mgr inż. Tatiany Nowickiej pt. „Opracowanie technologii wytwarzania na skalę przemysłową drukowanych czujnika lub grupy czujników na podłożach elastycznych do bezprzewodowego monitorowania wybranych parametrów fizycznych mających zastosowanie w internecie rzeczy (IoT)”, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2023 r. poz. 742) i zgłaszam wniosek o dopuszczenie pani Tatiany Nowickiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom badań badawczo-wdrożeniowych tej rozprawy i wskazane w recenzji osiągnięcia o wysokiej wartości aplikacyjnej, zgłaszam wniosek o uznanie tej pracy doktorskiej jako wyróżniającej się.

Prof. dr hab. Jacek Ulański