

Szczecin 5 kwietnia, 2025

prof. dr hab. inż. Artur Bartkowiak
Centrum Bioimmobilizacji i Innowacyjnych Materiałów Opakowaniowych
Wydział Nauk o Żywności i Rybactwa
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Ocena pracy doktorskiej p. mgr Katarzyny Wasilewskiej
p.t.: „Opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania
termokurczliwego typu SSL z drukowanym sensorem temperatury”

wykonanej na Politechnice Warszawskiej
na Wydziale Elektrycznym
pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Małgorzaty Jakubowskiej
oraz promotora pomocniczego dr. hab. inż. Jarosława Szusta, prof. PB

Podstawą opracowania oceny jest:

- Informacja o wyznaczeniu mojej osoby do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora p. mgr inż. Katarzynie Wasilewskiej na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 911/II/2024 z dnia 10.12.2024 o
- praca doktorska mgr Jakuba Katarzyny Wasilewskiej

Globalny rynek opakowań inteligentnych odnotowuje dynamiczny wzrost, napędzany rosnącym zapotrzebowaniem na zaawansowane technologie w sektorach takich jak żywność, napoje, farmaceutyki i handel elektroniczny. Według raportu Fortune Business Insights, wartość tego rynku w 2024 roku wyniosła 24,66 miliarda USD i prognozuje się, że osiągnie 40,02 miliarda USD do 2032 roku, co odpowiada skumulowanemu rocznemu wskaźnikowi wzrostu (CAGR) na poziomie 6,32% w latach 2025-2032. W kontekście zastosowania druku elektronicznych sensorów na foliach termokurczliwych, brak jest szczegółowych danych liczbowych dotyczących wzrostu tego segmentu. Jednakże, rosnące zainteresowanie technologiami takimi jak RFID, NFC oraz sensorami drukowanymi wskazuje na potencjalny rozwój tego obszaru. Integracja takich technologii w opakowaniach inteligentnych umożliwi monitorowanie warunków przechowywania produktów, co jest szczególnie istotne w branżach wymagających precyzyjnej kontroli jakości, takich jak przemysł spożywczy czy farmaceutyczny. Podsumowując, rynek opakowań inteligentnych wykazuje znaczący potencjał wzrostu w nadchodzących latach, a innowacyjne technologie, w tym druk elektronicznych sensorów na foliach, mogą odegrać kluczową rolę w jego rozwoju.

Choć obecnie istnieją obiecujące wstępne badania nad drukowaniem sensorów temperatury na foliach termokurczliwych i ich integracją z technologią NFC, nadal jest to obszar wymagający dalszych badań i rozwoju, zwłaszcza w kontekście praktycznych zastosowań w inteligentnych opakowaniach czy monitorowaniu warunków przechowywania produktów.

W związku z tym uważam wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Wasilewskiej za bardzo interesujący i wpisujący się w obecne trendy naukowe ale także co bardzo istotne w oczekiwania związane z dynamicznym rozwojem branży inteligentnych opakowań wykorzystujących techniki drukowanej elektroniki. Szczególnie interesujący jest dla mnie fakt podjętej w ramach pracy próby przeskalowania procesów opracowanych w skali laboratoryjnej do rzeczywistych procesów produkcyjnych w warunkach przemysłowych.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest w formie monografii i liczy 123 strony plus 1 załącznik i została podzielona na 5 części z wydzielonym spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielski oraz wykazem ważniejszych skrótów. Praca jest zakończona podsumowaniem oraz spisem literatury. Zaproponowany podział jest co do zasady akceptowalny ale osobiście brakuje mi jednoznacznego wydzielenia części eksperymentalnej z wskazanymi i opisanymi materiałami oraz metodami badawczymi, opisu otrzymanych wyników, ich dyskusji i końcowych wniosków. Po streszczeniu w języku polskim i angielskim i krótkim wstępie autorka dokonała na podstawie przeglądu literatury naukowej opisu stanu wiedzy w obszarze etykiet termokurczliwych, potencjału drukowanej elektroniki w opakowaniach w tym szczególnie drukowanych sensorów temperatury z zastosowaniem funkcjonalności NFC. Na koniec omówione są przykłady badań z wykorzystaniem druku farb przewodzących na materiałach cienkowarstwowych typu elastyczne folie polimerowe. W tej części brakuje ogólnego zestawienia najlepiej w formie tabeli z opisem najważniejszych charakterystyk zastosowanych układów oraz otrzymanych wyników. Takie zestawienie ułatwiłoby zweryfikowanie celowości podjętych badań w świetle obecnego stanu wiedzy oraz na późniejszych etapach lektury łatwiejsze porównanie otrzymanych i opisanych wyników z wynikami prac innych autorów.

W wydzielonej części na stronie 29-32 zaprezentowano cel rozprawy doktorskiej. W części tej opisano genezę pracy w świetle obecnego stanu techniki, gdzie poza celem zaprezentowano zakres pracy z określeniem kluczowych elementów badawczo-poznawczych z punktu widzenia osiągnięcia założonego celu pracy. Celem ogólnym pracy jest opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania poprzez integrację elementów drukowanej elektroniki z etykietą termokurczliwą. Wskazano, że wynikiem przeprowadzonych prac będzie zaproponowanie innowacyjnej i nisko-kosztowej technologii produkcji inteligentnych opakowań z etykietą termokurczliwą dzięki zastosowaniu specjalnie dobranych farb w tym przewodzących i funkcjonalnych, technik ciągłego zadruku w systemie „roll to roll” oraz innych elementów procesowych jakie pozwolą na ciągłą produkcję takich inteligentnych etykiet z zastosowaniem obecnie dostępnych maszyn i urządzeń do druku i wykończenia materiałów foliowych stosowanych w produkcji zadrukowanych opakowań foliowych.

Przeprowadzone badania wraz z wynikami i dyskusją zostały podzielone na trzy kolejne części (część 3-5). Część pt. „Opracowanie technologii druku anteny NFC na podłożu termokurczliwym” to próba weryfikacji czy jest możliwe z wykorzystaniem dostępnych komercyjnie rozwiązań farbowych otrzymanie układów przewodzących jakie można nanosić typowymi metodami zadruku powierzchniowego folii. Do badań wytypowano 20 różnych farb przewodzących, które zostały zestawione w tabeli 4 na stronie 34-35. Były to farby pochodzące od 9 dostawców&producentów przeznaczonych dwóch technik nanoszenia (fleksografia i sitodruk) i różnych metod utrwalania (suszenie gorącym powietrzem lub sieciowanie UV) przy różnych warunkach suszenia (czas i temperatura). Ostatecznie na podstawie wyznaczonych warunków brzegowych tzn. temperatury suszenia nie wyższej niż 50°C (na podstawie badania termokurczliwości wybranej folii PET) oraz innych właściwości takich jak dobra adhezja do podłoża, wysoką elastyczność, odporność na zadrapania oraz stabilność właściwości przy

zmiennych warunkach procesowych, w tym wpływ skurczu podłoża foliowego, wytypowano ostatecznie 6 farb (Tabela 5). Dla tych farb fazą przewodząca był nanocząsteczki srebra, węgla oraz miedzi w ilości od 58% do 98% wag. udziału w stosunku do suchej masy. Niestety w pracy pomimo wskazania nazw komercyjnych i rekomendowanych przez producentów warunków suszenia nie podano dokładnego ich składu np. rodzaju zastosowanych żywic, rozpuszczalników czy ich % zawartości, co mogłoby być bardzo istotnymi danymi ze względu na powiązanie tych informacji z ich właściwościami np. lepkością oraz ostatecznie dobranych warunków i efektów procesu suszenia nanoszonych powłok. Sądzę, że pomimo poufnego charakteru pracy wobec przygotowanych już zgłoszeń patentowych jakie gwarantują ochronę własności intelektualnej w pracy powinny zostać lepiej tzn. bardziej precyzyjnie opisane zastosowane materiały oraz przedstawione doświadczenia, gdyż to pozwoliłoby na lepszą analizę otrzymanych wyników w świetle różnych zmiennych parametrów zastosowanych procesów. W ramach wstępnych badań określono górną granicę temperatury suszenia 50°C co jest spowodowane skurczem wybranej dedykowanej folii w temperaturach powyżej tego zakresu.

W ramach optymalizacji procesu druku past przewodzących [REDAKTOWANE] w warunkach laboratoryjnych dokonano weryfikacji kolejno szeregu parametrów takich jak prędkość liniowa druku [REDAKTOWANE] warunki suszenia dla suszenia farb UV i rozpuszczalnikowych, gdzie w tym ostatnio przyjęto czas suszenia w warunkach laboratoryjnych jako 2 godziny (niestety brak informacji o zastosowanych warunkach nawiewu czy efektywności wymiany powietrznej co w procesach powierzchniowego suszenia ma pierwszorzędne znaczenie) oraz ilość nanoszonej farby, gdzie wykazano, że zastosowanie wałka o mniejszej zdolności przenoszenia tzn. [REDAKTOWANE] i przy podwójnym kryciu otrzymuje się warstwy o najniższej rezystancji dla farb UV, rozpuszczalnikowych i wodnych oznaczonych odpowiednio jako S1, S2 i S3, gdzie we wszystkich tych farbach fazą przewodzącą stanowił proszek srebra. Badania oceny drukowalności potwierdziły, że zależy ona od lepkości nanoszonego układu. Przeprowadzone badania potwierdziły, że tylko 2 z testowanych 6 farb charakteryzują się wystarczającą adhezją i niestety żądana z testowanych farb nie ma wystarczającej odporności na zarysowanie. [REDAKTOWANE]

[REDAKTOWANE] Moją uwagę zwrócił fakt, że w pracy wymiennie stosuje się określenie farba, pasta i atrament, gdzie nie wiadomo czy faktycznie są one w tym przypadku synonimami czy są jednak jakieś określone różnice a jeżeli tak to jakie?

Badania wpływu % wielkości obkurczenia na właściwości przewodzenia farb komercyjnych wykonana ostatecznie tylko dla farby S2, która okazała się mieć najlepsze właściwości przewodzące, dobrą odporność za zadrapanie i najwyższą przyczepność do podłoża spośród 6 testowanych. Wyniki potwierdziły, że najlepsze wyniki tzn. najmniejszą zmianę rezystancji otrzymuje się [REDAKTOWANE]

[REDAKTOWANE] Szkoda, że autorka nie pokusiła się o próbę pogłębionego wyjaśnienia dlaczego obkurczanie w warunkach pary wodnej już [REDAKTOWANE] obkurcza powoduje tak wysoki wzrost rezystancji nanoszonej farby w porównaniu do obkurczania w strumieniu gorącego powietrza?

Na stronie 63 mamy swoiste podsumowanie wyników badań przeprowadzonych z wykorzystaniem komercyjnych farb przewodzących, które potwierdziły z jednej strony najlepsze wyniki dla farby S2 spośród innych komercyjnych jakie były wytypowane i testowane, jednakże nie będzie można stosować m.in. ze względu na wysoką lepkość i inne ograniczenia ich zastosowania w warunkach przemysłowych. Wyniki tych badań zostały

opublikowane w formie publikacji w czasopiśmie *Materials*, której współautorką jest doktorantka [1].

W kolejnej części (od strony 54) podjęto próbę otrzymania własnych heterofazowych przewodzących kompozytów farbowych opartych o komercyjne płatki srebra o różnej mikrometrycznej wielkości (2 i 10 μm). Dokonano wyboru produktu o mniejszych płatkach srebra ze względu na lepsze niższe wyniki rezystancji powierzchniowej otrzymanych farb przy jednoczesnej możliwości zastosowania większej ich zawartości (optymalnie 70% wag) w kompozycji farbowej co zdecydowanie poprawia ekonomikę procesu suszenia. W kolejnym etapie dokonano wyboru nośnika matrycy polimerowej, gdzie spośród trzech zaproponowanych PMMA, TU i komercyjnego produktu Laroflex wybrano ten ostatni ze względu na najkorzystniejsze właściwości reologiczne (str. 62) oraz dobrą jakość odwzorowania tworzonych zadruków, niską rezystancję, dobrą przyczepność do podłoża przy dobrych wynikach prób schnięcia (w sumie przetestowano 13 kompozycji – Tabela 7). W tym przypadku dziwi z jednej strony wykorzystanie w badaniach jako rozpuszczalnika m.in. szkodliwych substancji jak DMF, chlorek metylu czy toluen jakie nie powinny być stosowane do zadruku folii w produkcji opakowań oraz z drugiej brak próby poprawy właściwości reologicznych kompozycji PU i PMMA poprzez zwiększenie stężenia polimerów w testowanych układach. Badania druku fleksograficznego i właściwości użytkowych własnej receptury farby TK-0018 w porównaniu do wcześniej przetestowanej kompozycji komercyjnej S2 wykazały nieco lepsze właściwości w tym jej niższą rezystancję. Badania zadruku „roll to roll” potwierdziły, że obie farby zachowują się bardzo podobnie gdzie wraz ze wzrostem prędkości druku następuje pogorszenie rezystancji naniesionej ścieżki przewodzącej co wynika z pojawiających się defektów powierzchniowych i gorszego pokrycia folii. Badania wykazały także brak dużych różnic w kontekście zadruku ścieżek przewodzących na wcześniej naniesionych farbach kolorowych. Próby montażu Chipa pamięci ponownie potwierdziły konieczność poszukiwania własnego kleju, gdzie spośród 19 testowanych kompozycji tylko 3 (2 na bazie PU z dodatkiem estrów dwuzasadowych i jedna na bazie Laroflexu) przy 60-70% udziale płatków srebra wykazały właściwą wytrzymałość w tym odporność na naprężenia ścinające. Do dalszych testów wybrano kompozycje 16 Laroflex o największej odporności na naprężenie i gwarantującej najniższą rezystancję, gdzie optymalny czas suszenia w temperaturze 50C wynosił 2-4 godzin suszenia. Kolejne badania dotyczyły doboru materiałów i warunków do montażu diody oraz izolatora w postaci komercyjnej farby gdzie ten ostatni mógłby być efektywnie nanoszony metodą sitodruku. W ostatnim etapie badań dokonano prób aplikacji etykiet z nadrukowaną anteną NFC na opakowanie, gdzie okazało się że bez zastosowania dodatkowego zabezpieczenia procesie obkurczu w tunelu parowym nie można osiągnąć wysokiej skuteczności działania utworzonych układów (). Ostatecznie podjęto próbę wytworzenia sensora temperatury na podłożu termokurczliwym PET stosując do kolejnych elementów sensora następujące farby i procesy druku:

- materiał elektrody utworzono za pomocą własnej opracowanej farby TK0018 nanoszonej zgodnie z warunkami opracowanymi we wcześniejszych etapach pracy doktorskiej;

¹. Lepak-Kuc, S., Wasilewska, K., Janczak, D., Nowicka, T., & Jakubowska, M. (2022). Conductive Layers on a Shrinkable PET Film by Flexographic Printing. *Materials*, 15(10), 3649. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/10/3649>

- materiał warstwy aktywnej stanowiła farba komercyjna [REDACTED]

[REDACTED]

Niestety optymalne warunki uzyskane w próbach laboratoryjnych nie dały dobrego efektu w próbie druku na maszynie [REDACTED] ze względu z jednej strony zbyt dużej lepkości farby a przy próbach rozcieńczenia okazało się, że niestety rozlewność farby po transferze na folię PET nie jest wystarczająca, dlatego ostatecznie wybrano dla tej konkretnej farby zadruk [REDACTED] sitodruk jaki pozwala na pracę z farbami o zdecydowanie wyższych lepkościach i mniejszych rozlewnościach.

Ostatecznie na podstawie przeprowadzonych wszystkich badań w tym doboru i optymalizacji materiałów i metod ich nanoszenia w pkt. 5 przedstawiono schemat elektryczny układu pomiarowego, schemat układu warstwowego drukowanego układu do bezprzewodowego odczytu temperatury z anteną NFC oraz opisano rekomendowane metody druku struktur elektronicznych układu do bezprzewodowego odczytu temperatury na podłożu termokurczliwym folii PET co zostało także przedstawione w formie tabelarycznej na końcu pracy w ramach załącznika 1.

Na podkreślenie zasługuje umiejętny dobór i zastosowanie przez doktorantkę licznych różnorodnych, często bardzo unikalnych i komplementarnych metod badawczych.

Niestety w pracy brakuje pogłębionej dyskusji otrzymanych wyników i obserwowanych zależności w odniesieniu do publikacji innych autorów cytowanych w rozprawie (chodzi m.in. o cytowane publikacje 56-62) w jakich zastosowano podobne metody otrzymywania drukowanych elementów przewodzących na elastycznych podłożach foliowych. Dlatego bardzo proszę w trakcie obrony podczas odpowiedzi na recenzję o porównanie swoich wyników do wyników prac innych autorów w jakich prowadzono zbliżone badania. Na przykład poza wymienionymi powyżej publikacje:

1. Choi, J., Visagie, I., Chen, Y., Abbel, R., & Parker, K. (2023). NFC-Enabled Dual-Channel Flexible Printed Sensor Tag. *Sensors*, 23(15), 6765.
2. Escobedo, P., Bhattacharjee, M., Nibakhtnasrabadi, F., & Dahiya, R. (2021). Flexible strain and temperature sensing NFC tag for smart food packaging applications. *IEEE Sensors Journal*, 21(23), 26406-26414.

Chciałbym aby w ramach odpowiedzi zostało przygotowane zestawienie tabelaryczne różnic i podobieństw badanych układów w kontekście ostatecznie opisanych wyników i wskazanych zależności. Czy na podstawie literatury naukowej, patentowej lub informacji branżowych udało się zweryfikować w ostatnim czasie podobne próby pełnej integracji druku elektroniki na foliach nie koniecznie termokurczliwych z zastosowaniem maszyn przemysłowych w tym hybrydowych do druku wąskiej lub szerokiej wstęgi foliowej? Czy można się dowiedzieć jaki może być koszt wdrożenia i zastosowania takiej metody druku oraz jakie są obecne realne możliwości skalowania vs. ewentualne możliwości obniżenia kosztów produkcji takich elementów drukowanych elektronicznych sensorów na podłożach stanowiących opakowania. Dodatkowo po lekturze pracy doktorskiej nasunęło mi się pytanie czy w trakcie swoich badań doktorantka rozważała w jaki sposób ten nowy rodzaj etykiet będzie traktowany podczas procesu recyklingu opakowań zgodnie z nowymi obowiązującymi wymogami związanymi z przyjętym i opublikowanym 22 stycznia 2025 roku w dzienniku urzędowym UE rozporządzeniem w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych tzw. „PPWR”.

Ostateczne wnioski wynikające z pracy są zaprezentowane i sformułowane prawidłowo w formie opisowej, adekwatnie do zakresu badań i otrzymanych wyników ze wskazaniem najważniejszych według doktorantki obserwacji wynikających z poszczególnych badań jakie zostały wykonane w pracy.

Pracę zamyka wykaz literatury obejmujący 110 pozycji w tym głównie anglojęzyczna literatura naukowa z obszaru pracy oraz odnośniki do licznych karty technicznych stosowanych farb i innych komponentów wykorzystywanych w badaniach.

Podsumowując, należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoką wartość poznawczą dotyczącą otrzymywania układów drukowanych na cienkim podłożu w postaci folii PET z zastosowaniem skalowalnych metod przemysłowych. Doktorantka przeprowadziła badania możliwości otrzymywania w warunkach laboratoryjnych i następnie w warunkach przemysłowych układów pozwalających na określenie i weryfikację temperatury poprzez zastosowanie specjalnie skomponowanej farby przewodzącej na bazie cząstek srebra oraz komercyjnej farby aktywnej termo-wrażliwej. Jednakże należy podkreślić, że pomimo prób nie udało się w pracy i badaniach udowodnić, że jest możliwe wyprodukowanie takich układów w ciągłym procesie „roll to roll”. Natomiast wyniki pracy wskazują już na gotowe propozycje oryginalnych rozwiązań zarówno farbowych jak i metod ich aplikacji oraz przedstawiają te elementy jakie powinny być tematem kolejnych badań laboratoryjnych i prac rozwojowych.

Jakość wykonanych przez mgr Katarzynę Wasilewską badań oraz sposób ich opisu oceniam pozytywnie, aczkolwiek sam sposób prezentacji w pracy jest dla mnie nie do końca czytelny. W trakcie lektury części doświadczalnej oraz opisu wyników przeprowadzonych badań nasunęły mi się pewne pytania i dlatego proszę, aby Doktorantka w czasie obrony ustosunkował się do następujących kwestii:

Str. 44. Dlaczego grafitowa farba [REDAKTOWANE] wymaga zamkniętej komory rakłowej, ograniczającej odparowanie rozpuszczalnika z farby, gdzie w tym przypadku rozpuszczalnikiem jest woda, a w innych przypadkach farb np. S2, C1 i S4 są zastosowane rozpuszczalniki organiczne prawdopodobnie o zdecydowanie wyższej prężności par w stosowanych temperaturach druku i w tym przypadku druk zachodził bez problemu?

Str. 45. Czy dokonano próby korelacji pomiędzy rozlewnością farby (widoczna między innymi jako szerokość wydrukowanych pasków na rys 3.7) a lepkością zastosowanych farb (rysunek 3.6). Czy nie powinno być tutaj jakieś korelacji? Czy dokonano próby korelacji napięcia powierzchniowego testowanych farb vs. efektywność pokrycia/zadruku?

Str. 59: Proszę o dyskusję dlaczego dokonano wyboru jako nośnik polimerowy komponowanych własnych farb przewodzących polimerów z grupy PU, PMMA i Laroflex (brak w pracy podanej właściwej nazwy chemicznej żywicy – informacja dostępna na stronie producenta) z uwzględnieniem charakterystyki fizyko-chemicznych żywic jakie zostały wybrane?

Str. 75. Co może powodować poprawę rezystencji nanoszonej ścieżki przewodzącej po naniesieniu na farbę graficzną cyan C w porównaniu do układu nanoszonego na samą folię w porównaniu do trzech innych testowanych kolorowych zadruków farb graficznych (tabela 9).

Str. 103. Na rysunku 4.8 przedstawiono wpływ temperatury na rezystancję zadrukowanego sensora temperatury, gdzie można zaobserwować nieliniową zależność wzrostu rezystancji w funkcji temperatur? Czy tego się mogliśmy spodziewać i jak się to ma to sytuacji kiedy zamiast farby dyspersyjnej mielibyśmy lity cienki przewód metalu? Na wykresie można zaobserwować także stosunkowo duże odchylenia standardowe i w związku tym mam pytanie na ile te odchylenia mogą świadczyć o małej czułości i/lub dokładności takich sensorów a jeżeli tak co

może być tego przyczyną i/lub jak można zmniejszyć obserwowane odchylenia? Czy i na ile podobne zależności zaobserwowano dla układów nadrukowanych w warunkach przemysłowych?

Str. 106: W pracy nie przeprowadzono pogłębionej dyskusji wyników pomiarów lepkości w kontekście braku możliwości zastosowania różnych technik druku w tym konieczności ich rozcieńczenia. Ciekawe byłoby określenie na ile sam dodatek proszków metalicznych wpływa nie tylko na lepkość ale także na zwilżalności i zdolność transferu do i z aniloksów tak dobranych farb. Być może zastosowanie dodatków w postaci związków poprawiających właściwości reologiczne np. związków powierzchniowo-czynnych mogłoby wpłynąć korzystnie na obserwowane trudności podczas transferu i zadruku powierzchni?

Od strony opisowej w pracy pojawiają się pewne nieścisłości dotyczące opisów i prezentowanych wyników, np.:

- w wielu przypadkach rysunki są niekompletne lub opisane w sposób niewystarczający do określenia w jakich warunkach były prowadzone dane badania lub jakich dokładnie układów dotyczyły (rys. 3.7 – w jakich warunkach przygotowano zadruk – rodzaj/wielkość kałamarnicy oraz liniatury; rys. 3.8 – brak informacji o powiększeniu lub stosownej skali; rys. 3.9 – brak informacji zarówno w opisie rysunku i tekście rozprawy jak wyglądały same badania FINAMT FTM 27 – brak odnośnika do literatury; rys. 3.11 – brak informacji o jaki sposób nanoszenie warstw chodzi i w jakich warunkach doszło do obkurczu, rys. 3.14 – brak informacji o jaki kompozyt chodzi; rys. 3.17 – brak na wykresie krzywej lepkości dla pasty na bazie PU; rys. 33 – brak informacji o jakie połączenie klejowe chodzi),
- str. 34: Informacja, że na rysunku 3.6 wynik dla farby S2 został pominięty (a jednak jest) przy braku na wykresie wyniku dla farby S1, dla który co ciekawe na stronie 44 jest przytoczona wartość lepkości na poziomie zbliżonym do farb S2 i C1;
- str. 101: Na rysunku 4.6 zostały zaprezentowane trzy krzywe, jednakże nigdzie ani w opisie samego rysunku ani w tekście nie ma informacji co reprezentują te trzy krzywe?

Chciałbym podkreślić, że wszystkie powyższe pytania wynikają z mojej jako recenzenta ciekawości i w żadne sposób nie obniżają wartości naukowej i poznawczej ocenianej pracy.

Od strony graficznej praca jest wykonana starannie, z czytelnymi tabelami, rysunkami, zdjęciami zastosowanych urządzeń i zestawów badawczych, w tym próbek np. powierzchni otrzymanych zadruków farbami przewodzącymi zarówno w mikroskopii świetlnej jak i elektronowej. Zabrakło mi dla lepszego zobrazowania ogólnego schematu graficznego przyjętej metodyki i zakresu pracy, co z pewnością ułatwiłoby zrozumienie kolejności podejmowanych badań. W pracy pojawiają się nieliczne błędy edytorskie w tym interpunkcyjne oraz nieprecyzyjne lub czasami niewłaściwe określenia wynikające m.in. z bezpośredniego tłumaczenia pewnych sformułowań z języka angielskiego. Na przykład na stronie 18 rynek inteligentnych opakowań w roku 2023 został oszacowany na kwotę 56 bilionów dolarów, co wynika z błędnego bezpośredniego tłumaczenia słowa, gdzie należy pamiętać, że „billion” w języku angielskim odpowiada polskiemu „miliardowi”, a polski „bilion” to 1000 angielskich „billions”. Chciałbym zwrócić uwagę także, że zastosowanie potocznie używanego słowa „gęsty” w sformułowaniu na stronie 106 „jest farbą zbyt gęstą” ma się nijak do opisywanych różnic lekkości, gdyż gęstość może ale nie musi mieć bezpośredniego związku z lepkością.

Wszystkie przytoczone powyżej uwagi wynikają z moich jako recenzenta wątpliwości oraz pytań do dyskusji w trakcie obrony pracy doktorskiej, które pozwolą mi podczas obrony na podjęcie decyzji co ostatecznej oceny przygotowanej pracy. Chciałem podkreślić moją pozytywną opinię na temat wysokiego poziomu innowacyjnego i interdyscyplinarnego pracy doktorskiej mgr Katarzyny Wasilewskiej. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że autorka doktoratu w trakcie realizacji pracy przygotowała dwie publikacje oraz jedno zgłoszenie patentowe tożsame z wynikami opisanymi w pracy.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego wyboru właściwych komponentów farb i technik na efektywne nanoszenie warstw przewodzących na podłoża z folii termokurczliwych PET. W sumie w ramach badań przetestowano sześć komercyjnych oraz 13 samodzielnie skomponowanych tuszy przewodzących pod kątem ich przydatności do druku sensorów temperatury SSL na cienkich podłożach w postaci termokurczliwych folii PET. Analizowano liczne parametry procesowe m.in. takie jak lepkość tuszu, adhezja do podłoża oraz przewodność elektryczna warstw przed i po procesie skurczu termicznego. Stwierdzono, że niektóre tusze, mimo dobrej przewodności, wymagały wysokich temperatur suszenia, co negatywnie wpływało na ich właściwości przewodzące po procesie suszenia. Przeprowadzone badania ostatecznie potwierdzają możliwość aplikacji warstw przewodzących bezpośrednio na termokurczliwe, elastyczne podłoża za pomocą metod druku. Szczególnie interesujące był fakt, że dokonano ostatecznego wyboru i zastosowano dwie typowe techniki druku na podłożach foliowych tzn. sitodruk który jest częściej wykorzystywany do nanoszenia farb przewodzących a w przypadku tego rozwiązania zastawano ją do druku farb specjalnych przewodzących termoczulych oraz fleksografię jaka jest dotychczas częściej stosowana do druku wysokonakładowego na opakowaniach elementów typowo graficznych, ale rzadziej dotychczas wykorzystywano ją do druku farb przewodzących szczególnie w warunkach przemysłowych.

Po zapoznaniu się z przedstawioną do oceny pracą dokorską mgr Katarzyny Wasilewskiej stwierdzam, że spełnia ona wymogi formalne stawiane tego typu opracowaniom zgodnie z art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14.03.2003 (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pani mgr Katarzyny Wasilewskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

DYREKTOR
Centrum Badań i Usług Innowacyjnych
Nanotechnologii i Materiałowych
Prof. dr hab. inż. Artur Barabankiewicz