

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Karol Leluk

ORCID: 0000-0002-1992-7477

Scopus: 23975869900

Web of Science: DWN-5329-2022

PBN: 5e7091f9878c28a04738dfc1

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Stopień doktora: 22 września 2009 roku
Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii
doktor nauk chemicznych,
w zakresie chemii fizycznej i teoretycznej
Rozprawa doktorska: „Dielektryczne badania kaolinitu i jego interkalowanych pochodnych”

Promotor: dr hab. Kazimierz Orzechowski, prof. UW.

Recenzenci: prof. dr hab. Aleksander Koll, dr hab. inż. Janina Pospieszna, prof. PWr

Tytuł magistra: 16 czerwca 2005 roku
Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii
magister chemii, studia jednolite
Praca magisterska: „Dielektryczne badania nowego materiału EMC”

Promotor: dr hab. Kazimierz Orzechowski, prof. UW.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1 września 2020r. – obecnie	Prodziekan ds. badań naukowych i współpracy zagranicznej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska
1 października 2013r. – obecnie	adiunkt badawczo-dydaktyczny, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska
1 października 2013r. – obecnie	adiunkt
30 września 2012r. – 1 października 2013r.	asystent naukowo – dydaktyczny, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska
19 października 2009 – 30 września 2012r.	asystent naukowy, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska
19 października 2009 – 1 października 2013r.	asystent

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn.zm.)

Osiągnięcie naukowe

Za znaczące osiągnięcie naukowe na ścieżce kariery zawodowej po uzyskaniu stopnia doktora uważam doświadczalną analizę możliwości modyfikacji polikwasu mlekowego w kierunku zmian jego właściwości fizycznych, w szczególności powierzchniowych, pod kątem aplikacji biomateriałów w przemyśle opakowaniowym. Kwestia substytucji tworzyw pozyskiwanych ze źródeł nieodnawialnych, materiałami zrównoważonymi jest istotną kwestią w obliczu prowadzonej polityki dotyczącej zachowania równowagi surowcowej i implementacji zasad gospodarki obiegu zamkniętego. Obecnie problemem nie jest pozyskanie surowców i wytworzenie tworzyw polimerowych ze źródeł odnawialnych, ale wykonanie takich biomateriałów których właściwości fizykomechaniczne można uznać za porównywalne z szeroką paletą obecnie stosowanych tworzyw polimerowych ze źródeł kopalnych. Prowadzone przeze mnie badania dotyczące zaprojektowania, wykonania oraz charakterystyki właściwości fizykomechanicznych biokompozytów wpisują się w naukowy nurt poszukiwania termoplastycznych materiałów polimerowych spełniających założenia zasad gospodarki obiegu zamkniętego oraz zapewnienia satysfakcjonujących klienta końcowego właściwości użytkowych jak i efektywności ekonomicznej wyrobów z nich wykonanych.

Na osiągnięcie naukowe składa się monotematyczny cykl 7 publikacji wymienionych w załączniku 4, poz. **A1 – A7**, o sumarycznym wskaźniku Impact Factor wynoszącym 19,929 oraz łącznej liczbie punktów MNiSW wynoszącej 470. Oba wskaźniki liczone wg notowań na rok publikacji odpowiednich artykułów. Udział własny poszczególnych autorów został przedstawiony w załączniku 5 (oświadczenia o udziale autorów publikacji), wraz z pełnymi tekstami prac.

Tytuł osiągnięcia (na podstawie monotematycznego cyklu publikacji):

Modyfikowane biokompozyty polimerowe do zastosowań w sektorze opakowaniowym.

Kontekst osiągnięcia

Ewolucja społeczeństw w kierunku implementacji i wykorzystania, także w życiu codziennym, zaawansowanych rozwiązań technologicznych w zakresie m.in.: budownictwa, transportu, opakowań, elektroniki, pociąga za sobą konieczność pozyskania większej ilości surowców do wytwarzania (nowych) materiałów. Sprostanie rosnącym wymogom użytkowym wymaga rozwoju w zakresie materiałoznstwa, także przeprowadzenia modyfikacji już znanych materiałów o ugruntowanej pozycji na rynku. W tym kontekście tendencja wzrostowa produkcji tworzyw polimerowych jest naturalną konsekwencją, będącą odpowiedzią na zapotrzebowania rynku. Według danych

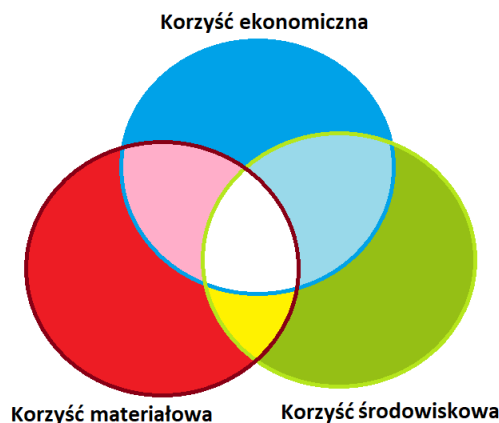
Plastics Europe, światowy wolumen tworzyw wprowadzanych na rynek, już w 2021 roku przekroczył poziom 390 milionów ton rocznie i mimo wyhamowania dynamiki prognozuje się dalszy jego wzrost. Większość tworzyw termoplastycznych (ok. 90% całkowitej ilości) pozyskiwana jest ze źródeł kopalnych, podczas gdy ok. 8% stanowią materiały ponownie wprowadzone do obiegu z recyklingu (których pierwotnym źródłem były zasoby nieodnawialne), a zaledwie ok. 1,5% całkowitej ilości stanowią surowce określane mianem „biokomponenty”. Proporcje tych udziałów przedstawione dla Starego Kontynentu niewiele odbiegają od rynku globalnego i wynoszą odpowiednio około: 87%, 11%, 2%. W odniesieniu do ostatniej grupy należy zwrócić uwagę, że raport Plastics Europe do grupy określanej jako „biokomponent” wlicza tworzywa ze źródeł odnawialnych (tzw.: „bio-based”) jak i takie do wytworzenia których użyto częściowo surowców odnawialnych (tzw.: „bio-attributed”). W kontekście realizacji Agendy na rzecz Zrównoważonego Rozwoju (SDG), przyjętej Rezolucją przez Zgromadzenie Ogólne ONZ dnia 25 września 2015 roku, określającej 17 celów które mają być osiągnięte do 2030 roku, taka nomenklatura jest zasadna, jako że uwzględnia ona wszelkie materiały i działania podjęte w kierunku ich wytworzenia mające w efekcie doprowadzić do redukcji śladu węglowego, czy szerzej – realizacji wytycznych polityki gospodarki obiegu zamkniętego. Jednakże w aspekcie czysto naukowym za biomateriał nie powinno uznawać się produktów rynkowych w skład których wchodzi surowce nieodnawialne, nawet w niewielkim stopniu. Jeśli zatem z zestawienia Plastics Europe wykluczyć podgrupę materiałów otrzymanych częściowo z surowców odnawialnych, to także w aspekcie ekonomicznym ilość biotworzyw (wytwarzanych w 100% z surowców odnawialnych) jest marginalna. Stąd też nie dziwi prognozowana dynamika przyrostu zdolności produkcyjnych tego podsektora, określona w raporcie stowarzyszenia European-Bioplastics e.V. na 36% w pięcioletnim okresie do roku 2025.

Stan niskich wolumenów ma swoją przyczynę przed wszystkim w ograniczonych właściwościach użytkowych termoplastycznych biopolimerów, jak np.: niewielka elastyczność i udarność, wytrzymałość na obciążenia statyczne czy odporność na promieniowanie UV. Dlatego też istotnym jest, oprócz poszukiwania nowych surowców odnawialnych i metod syntezy biotworzyw, także prace badawczo-rozwojowe prowadzone w kierunku modyfikacji konkretnych właściwości istotnych dla danej aplikacji bądź (co trudniejsze) całej gałęzi gospodarki.

Biorąc pod uwagę wielkość światowego rynku tworzyw sztucznych, wymagania stawiane przed tymi materiałami a także przyjęty kierunek zmian w gospodarce europejskiej i jej powiązania z dwoma największymi – rynkiem Stanów Zjednoczonych oraz Chińskiej Republiki Ludowej, poznanie możliwości modyfikacji biotworzyw jest uzasadnionym kierunkiem badań, naturalnie wynikającym z potrzeby rynku. Tylko zapewnienie satysfakcjonujących właściwości użytkowych pozwoli na naturalną ekspansję podsektora biotworzyw bez konieczności stosowania dodatkowych regulatorów rynku w postaci mniej korzystnych mechanizmów finansowania technologii i produktów o wysokim śladzie węglowym.

W pracach badawczych pod uwagę brałem możliwość wytworzenia materiałów które nie tylko będą wpisywać się w kategorię materiałów o **możliwie niskim negatywnym oddziaływaniu na środowisko** naturalne, ale także **możliwie korzystnych pod względem ekonomicznym** i, naturalnie, **użytkowym**. Należy przy tym zauważyć, że w obecnym stanie techniczno-ekonomicznym nie jest możliwe spełnienie tych trzech wymagań w równym stopniu. Balans tych opcji dobrze opisuje poniższa grafika „trójkąta równoważności”, jakościowo przedstawiająca zależności pomiędzy trzema wymienionymi aspektami. Obecnie większość materiałów spełnia korzystnie warunek właściwości materiałowych i/lub ekonomicznych, zaniedbując efekt środowiskowy. Pamiętać należy, że

pod pojęciem „efekt środowiskowy” kryje się nie tylko źródło pochodzenia materiału (surowiec odnawialny/nieodnawialny) ale także rodzaj domieszek i stopień emisyjności technologii ich wytwarzania. Ze względu na niewielki wolumen produkcji biokomponentów ale także zaawansowanie technologiczne (wielkość operacji jednostkowych i konieczność uwzględnienia wielu surowców w procesie), materiały o możliwie niskim negatywnym oddziaływaniu na środowisko plasują się daleko od obszaru korzystnego ekonomicznie. Bazując na dostępnych dziś komercyjnie materiałach, badania nad biokompozycjami należy więc prowadzić w kierunku obszaru zajmującego centralne miejsce na rys. 1., stanowiącego równowagę pomiędzy szeregiem stawianych materiałowi wymagań.



Rys. 1. Wzajemne przenikanie obszarów korzyści.

Prowadząc prace badawcze nad nowymi materiałami, które mają wpisywać się synergicznie w/w korzyści istotnym jest branie pod uwagę poniższych założeń:

- 1) minimalizacja udziału surowców pochodzących ze źródeł kopalnych. Surowce naturalne powinny korzystnie podlegać naturalnym procesom rozkładu;
- 2) możliwie minimalny udział przyczynków związanych z (potencjalnymi) źródłami nieodnawialnymi. Korzystnie będzie to wyłącznie energia do procesu przetwórczego i otrzymywania w procesach fizycznych i/lub chemicznych surowców użytych w procesach, oraz budowy parku maszyn przetwórczych;
- 3) wytwarzanie i charakterystyka właściwości kompozytów w kierunkach mających potencjał aplikacyjny. Aplikacyjność rozumiana w aspekcie inżynierskim – zadowalających właściwości użytkowych, z punktu widzenia klienta końcowego – konsumenta i/lub gałęzi przemysłu (najczęściej opakowaniowego) ale i ekonomicznym;

Stąd w każdej z prac, w szczególności wymienionych w cyklu publikacji [załącznik 4, poz **A1** – **A7**] kierowano się rekomendacjami sformułowanymi poniżej (w kolejności alfabetycznej):

- 1) aktualnie obowiązujące **cenniki** materiałów;
- 2) **dostępność** użytych surowców – w szczególności w odniesieniu do napelniaczy;
- 3) **właściami** jakie mogą posiadać kompozyty wykonane z ich udziałem;

W poruszonym przeze mnie obszarze badawczym skupiłem się głównie na polikwasie mlekowym, jako najbardziej rozpowszechnionym komercyjnie biotworzywie o akceptowalnych właściwościach przetwórczych, wytrzymałościowych a także koszcie wytworzenia. Na rynku istnieje wiele tańszych, komercyjnych materiałów (jak np.: skrobia termoplastyczna) o mało satysfakcjonujących właściwościach użytkowych bądź też takich których właściwości mechaniczne są zadowalające (jako kopolimery politereftalan adypinianu butylenu, czy układy oparte na skrobi termoplastycznej i polikaprolaktonie/octanie celulozy/alkoholu etylowinylowym), ale mało korzystne ekonomicznie. Dobierając modyfikatory matrycy, starałem się uczestniczyć w badaniach które na wstępie odrzucają możliwość zastosowania drogich (acz o dobrych właściwościach użytkowych – jak np.: polimery przewodzące) modyfikatorów w kierunku stosowania materiałów występujących naturalnie bądź pozyskanych z surowców odnawialnych w wyniku prostych czynności laboratoryjnych. Ten ostatni aspekt (choć nie mający najwyższego priorytetu na etapie większości badań) jest istotny z punktu widzenia późniejszego podnoszenia gotowości technologicznej, kiedy to możliwie minimalna ilość operacji jednostkowych będzie przenosiła się na korzyść finansową inwestycji i w efekcie procesu. Stąd też w dwóch pracach (**A7** i **A6**) jako napelniacze zostały użyte ekstrakty z roślin, przy czym ekstrakt z rozmarynu (**A6**) został uzyskany w laboratorium jako produkt niekomercyjny. Komercyjnie dostępne napelniacze użyte w pracach to przede wszystkim szeroko dostępne włókna naturalne oraz syntetyczne pochodzenia naturalnego (Cordenka), czy sadza bądź mineralne (węglan wapnia i montmorylonit).

W opisanych poniżej badaniach przyjęto następujące nazewnictwo:

PLA – polikwas mlekowy

UV – promieniowanie ultrafioletowe, wykorzystane do naświetlania próbki w procesie przyspieszonego starzenia

FT-IR – spektroskopia podczerwieni z transformatą Fourier'a

DSC – różnicowa skaningowa kalorymetria

TG/DTG – termogravimetria/różnicowa termogravimetria

SEM – skaningowy mikroskop elektronowy

PEG – glikol polietylenowy

R – ekstrakt alkoholowy rozmarynu

PBS – bursztynian polibutylenu

Mater-Bi[®] – nazwa linii surowcowej oferowanej przez Novamont (Włochy). Do badań użyto materiału EF51L

PEF – pulsacyjne pole elektryczne

LDPE – polietylen niskiej gęstości

PBAT – politereftalan adypinianu butylenu

CE – modyfikator długości łańcucha polimerowego

MMT – montmorylonit modyfikowany organicznie (interkalowany aminą III rzędową)

AFM – mikroskop sił atomowych

Publikacja A7

Iuliana Spiridon, **Karol J. Leluk**, Ana Maria Resmerita, Raluca N. Darie

Evaluation of PLA-lignin bioplastics properties before and after accelerated weathering. Composites. Part B, Engineering. 2015, vol. 69, s. 342-349, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.006> [załącznik 4, poz. A7].

W zakresie badawczym publikacja obejmuje tematykę otrzymywania termoplastycznych **biokompozytów PLA**, napełnianych dwoma rodzajami ligniny, poddanie kompozytów procesowi przyspieszonego starzenia (czynniki aktywne: UV, temperatura, wilgotność), a następnie pomiar i porównanie szeregu właściwości fizyko mechanicznych. Badania objęto charakterystykę chemiczną (FT-IR) napełniaczy, zmianę właściwości mechanicznych (statyczne rozciąganie, udarność Charpy), charakterystycznych temperatur przemian fazowych (DSC, TG/DTG), sorpcyjne (DVS), jak i morfologii powierzchni (SEM, zwilżalność). Podstawą analizy były wyniki powyższych badań, którą to analizę prowadzono w odniesieniu do materiału wyjściowego (PLA), oraz kompozytów z **ligniną** uzyskując informację na temat wpływu obu ekstrahowanych komponentów na właściwości biokompozytu jak i procesu przyspieszonego starzenia.

Dodatek komponentu roślinnego do PLA spowodował wzrost sztywności, spadek wytrzymałości na zerwanie i wydłużenia przy zerwaniu, co zostało zinterpretowane jako właściwość wynikająca ze parametrów wytrzymałościowych samego napełniacza. Zauważyć przy tym należy, że mimo dodania równoważnej ilości (7%) obu napełniaczy, o proporcjonalności zmian można mówić w przypadku ligniny ekstrahowanej z drzewa brzoźowego w wyniku procesu ekstrakcji kwasem octowym i fosfonowym. Analiza FT-IR potwierdziła obecność pozostałości kwasu octowego i furfuralu po procesie lignifikacji w materiale pozyskanym z drzewa brzoźowego. Te różnice strukturalne przekładają się także na zachowanie komponentu roślinnego w analizie termogravimetrycznej, gdzie inni autorzy wskazują na tożsamą temperaturę w której następuje największa utrata masy ale różnią się one całkowitą wartością utraty masy próbki.

Wysoka adhezja międzyfazowa i mieszalność obu komponentów (ligniny i matrycy polimerowej) została potwierdzona w szeregu testów. W wyniku badań DSC, przeprowadzonych przez habilitanta, stwierdzono obecność pojedynczego sygnału przejścia szklonego – T_g , jak i podniesienie wartości temperatury mięknięcia (T_m) sugerujące pojawienie się oddziaływań wodorowych pomiędzy dwoma fazami w kompozycie. Zdjęcia mikroskopowe SEM nie ujawniły obecności charakterystycznych dla układów o niskiej mieszalności wystąpień międzyfazowych, potwierdzając tezę o jednofazowości układu, jak i wynik badania Charpy. W tym ostatnim teście zarejestrowano wzrost udarności w kompozytach w stosunku do niemodyfikowanego PLA, w szczególności kompozytu napełnianego ligniną ekstrahowaną z drzewa brzoźowego – aż o 27%.

Starzenie kompozytów przeprowadzone w komorze starzeniowej (czas trwania eksperymentu: 600h) spowodowało wystąpienie szeregu typowych zmian dla tego procesu, w tym obniżenie parametrów wytrzymałościowych, temperatur przejść fazowych (degradacja w obszarach amorficznych), oraz morfologicznych (SEM) i zwiększenie charakteru polarnego kompozytów.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji należy uznać:

- potwierdzenie doświadczalne otrzymania odnawialnego biokompozytu o właściwościach bardziej korzystnych niż jego surowce;
- Powiązanie niewielkich różnic strukturalnych obu napełniaczy z wynikającymi właściwościami mechanicznymi obu kompozytów;
- Określenie zachowania kompozytów w podwyższonych temperaturach i po procesie przyspieszonego starzenia;
- Kompleksowa weryfikacja danych dotyczących oddziaływań międzycząsteczkowych w kompozytach (płynących z badań DSC, SEM, DVS) na właściwości makroskopowe (wł. mechaniczne, zwilżalność), a w tym kontekście
- Ukazanie aplikacyjności biokompozytu PLA, wykonanego z surowców odnawialnych do zastosowań w materiałach o wysokiej udarności;

Publikacja A6

Raluca N. Darie-Nițăautor, Cornelia Vasile, Elena Stoleru, Daniela Pamfil, Traian Zaharescu, Liliana Tartău, Niță Tudorachi, Mihai Brebu, Gina Mihaela. Pricope, Raluca Petronela. Dumitriu, **Karol J. Leluk**
Evaluation of the rosemary extract effect on the properties of polylactic acid-based materials. Materials. 2018, vol. 11, nr 10, art. 1825, s. 1-33, <https://doi.org/10.3390/ma11101825> [załącznik 4, poz. **A6**]

Kontynuacją tematu badawczego przedstawionego w publikacji powyżej, a wymienionej w załączniku 4 w pozycji **A7**, było użycie kolejnego napełniacza pozyskanego w wyniku procesu ekstrakcji chemicznej z surowca odnawialnego – rozmarynu. Surowce pochodzące z biomasy są obiecującym materiałem do wytwarzania biokompozytów, ze względu na powszechną dostępność, odnawialny charakter jak i relatywnie nieskomplikowany technologicznie (pod względem ilości procesów jednostkowych jak i ilości i charakteru substancji pomocniczych) proces pozyskiwania. Weryfikacji doświadczalnej poddano w publikacji szereg właściwości **biokompozytu PLA** napełnianego **ekstraktem z rozmarynu** (w postaci stałej), w szczególności pod kątem właściwości biostatycznych i antyutleniających. Proszek ekstraktu rozmarynowego został otrzymany z liści tej rośliny w wyniku procesu ekstrakcji alkoholem etylowym w kolumnie Soxhleta a następnie procesu strącania osadu produktu końcowego. Szczegóły procesu zostały opisane w materiale źródłowym publikacji. Napełniacz (ekstrakt rozmarynowy) został wybrany nie tylko ze względu na powszechność występowania tej rośliny jak i (co oczywiste) jej odnawialny charakter, ale również ze względu na szerokie zastosowanie w gałęzi farmaceutycznej lecznictwie ze względu na swoje właściwości: antydepresyjne, antyproliferacyjne, bakteriostatyczne, przeciwmiażdżycowe, hipocholesterolemiczne, hepatoprotekcyjne, wspomagające walkę z nadciśnieniem oraz otyłością. Tak szeroka aktywność biologiczna surowca przypisywana jest udziałowi szeregu bioaktywnych komponentów należących głównie do następujących grup: kwasów fenolowych, flawonoidów, di- i triterpenów. Olejek rozmarynowy, ze względu na właściwości biostatyczne i antyoksydacyjne, jest szeroko używany jako środek konserwujący w przemyśle spożywczym jednocześnie działa korzystnie neutralizując wolne rodniki, czy wspomagając system odpornościowy ustroju.

Wykonane na bazie PLA biokompozyty zawierały do 0,75% (masowych) ekstraktu. Dodatkowo sporządzono dwie kompozycje z plastyfikatorem **PEG** w ilości 20% masowych – jedną jako mieszaninę PLA/PEG a drugą zawierająca 0,50% domieszki ekstraktu. Materiał poddano następnie szeregowi testów jak: wytrzymałość na zerwanie, reologia, DSC, TG-FTIR/MS, SEM, FT-IR, chmilyminescencja (CL), aktywność antyoksydacyjna, aktywność antybakteryjna, testy przepuszczalności gazów wobec CO₂/O₂, migracji, biokompatybilności in-vitro (poprzez pomiary kąta zwilżania i obliczenia SFE) oraz testów in vivo.

Dodatek PEG do kompozytu PLA zawierającego 0,5% ekstraktu powoduje lepszą mieszalność: zwiększa się stopień dystrybucji cząstek napełniacza przekładając się na lepszą homogenizację, a jego średni rozmiar spada z 14 do 4 mikronów co potwierdzają zdjęcia SEM. Badanie mikroskopowe wykazało także powstanie aglomeratów, potwierdzonych w uzyskanych wynikach z eksperymentu DSC – dodatek PEG indukował dodatkowe sygnały na widmie których nie stwierdzono dla dwuskładnikowego układu PLA/napełniacz.

Ukonstytuowanie dobrej adhezji międzyfazowej pomiędzy PLA a napełniaczem zostało również wykazane dzięki badaniu FT-IR – przesunięcia pasm świadczą o wystąpieniu oddziaływań natury adhezyjnej pomiędzy fazą matrycy polimerowej (PLA) jak i fazą rozproszoną. Zarówno w kompozycjach dwuskładnikowych zawierających ekstrakt jak i plastykowanym PEG układzie trójskładnikowym.

Na bazie tych obserwacji, zachowanie kompozytów w badaniach wytrzymałościowych wydaje się uzasadnione: Wytrzymałość: dodatek R (niezależnie od ilości napełniacza) podniósł moduł o ok. 20%, wytrzymałość o 10% i spadek wydłużenia o ok. 25%, ale już użycie plastyfikatora spowodowało wzrost wydłużenia o 100% (w porównaniu do PLA niemodyfikowanego) przy jednoczesnym zmniejszeniu modułu do ok. 1250 MPa (z 2550 MPa) i wytrzymałości do ok. 29 MPa (z 59 MPa). Podobnie w reologii – spadek wszystkich modułów (G' i G'') w kompozytach jak i zespolonej lepkości.

Co istotne, w kontekście zastosowań materiału jako opakowaniowego (do żywności), dodatek ekstraktu obniżył (ok. sześciokrotnie w stosunku do wartości początkowej mierzonej dla matrycy PLA) przepuszczalność wobec tlenu i dwutlenku węgla dla wszystkich badanych kompozytów. Także stopień migracji komponentu ekstrahowanego z kompozytu malał wraz ze wzrostem jego udziału w analizowanym materiale i po 18 dniach wynosił ok. 48%, 16% i 9% (odpowiednio dla udziałów ekstraktu 0,25%, 0,50%, 0,75%). Obliczenia parametrów kinetycznych procesu zostały wykonane dopasowując dane eksperymentalne do modelu Korsmeyer-Peppas oraz Higuchi dając dobrą zgodność pomiędzy stopniem migracji a stopniem krystaliczności (obliczonym na podstawie badań DSC), przepuszczalności gazów, czy danymi spektroskopii FT-IR. W aspekcie potencjału badanego materiału jako bioopakowania, należy wspomnieć o obiecujących właściwościach biostatycznych. W kompozytach dwuskładnikowych, dla szczepu *Salmonella Typhimurium* aktywność po 48h ekspozycji malała do 85%, natomiast w przypadku *Escherichia Coli* oraz *Bacillus* zaobserwowano praktycznie całkowite jej zahamowanie. Z kolei w trójskładnikowym układzie plastykowanym PEG zaobserwowano całkowite zahamowanie aktywności wszystkich trzech typów po 48h.

Istotnym aspektem poznawczym opisanym w publikacji było przeprowadzenie przez habilitanta testów biokompatybilności metodą in vitro. W tym celu dla badanych kompozytów zmierzono kąty zwilżania wobec wody, formamidu i diiodometanu (cieczki reprezentatywne o różnicowanych udziałach komponentu polarnego), a następnie obliczono swobodną energię powierzchniową z wykorzystaniem modelu van Oss – Chaudhary – Good. W modelu tym, całkowita wartość swobodnej energii powierzchniowej składa się z dwóch udziałów: kwasowo – zasadowego (γ^{AB} , wg modelu kwasów i zasad Lewisa) oraz opisującego oddziaływania Lifshitz – van

der Waals (γ^{LW}). Sposób w jaki powierzchnia badanych materiałów (s) oddziałuje z otoczeniem (w tym przypadku za cel postawiono determinację oddziaływań z krwią) będzie determinował jego kompatybilność. W przypadku krwi, należało więc ustalić wielkość i charakter oddziaływań z jej składnikami, na które w analizowanym przypadku wybrano płytki krwi (p) i czerwone ciała krwi (rbc). Realizując ten cel (i znając wyniki badań swobodnej energii powierzchniowej materiałów) obliczono wielkość pracy na granicy faz: powierzchnia kompozytu – płytka krwi ($W_{s/p}$) oraz powierzchnia kompozytu – krwinka czerwona ($W_{s/rbc}$). Składniki krwi wchodząc w kontakt z powierzchnią biomateriału, to zwilżalność, różna dla materiałów hydrofilowych i hydrofobowych staje się kluczowym parametrem określającym oddziaływanie w nowo utworzonym układzie. W przypadku płytek krwi, promocja adhezji będzie prowadziła do ich agregacji i w konsekwencji prowadząc do krzepnięcia, co w warunkach normalnego funkcjonowania ustroju jest zjawiskiem pożądanym, chroniącym przed utratą krwi. Natomiast, w przypadku wprowadzenia elementu pozaustrojowego, korzystnym jest eliminacja tych zjawisk jako mogących potencjalnie powodować zakrzepy.

Dodatek ekstraktu rozmarynowego jak i plastyfikatora, wpłynął na zwiększenie całkowitej wartości swobodnej energii powierzchniowej, oraz jej udziałów co przedstawia poniższa tabela 1. Istotnym jest zmiana wartości części kwasowo – zasadowej reprezentującej wielkość oddziaływań o charakterze polarnym, odgrywających znaczącą rolę w interakcji tkankami. Przyjęty model teoretyczny wg którego dokonano obliczeń całkowitej energii powierzchniowej, umożliwia również dyskusję wielkości udziału kwasowego i zasadowego w komponencie polarnym, co zostało także zaprezentowane w poniższej tabeli 1. Udział oddziaływań o charakterze zasadowym (γ^-) wyraźnie przeważa sugerując, że właściwości powierzchni są bogate w gęstość elektronową, zachowując się jak zasada Lewisa. Taki stan rzeczy wynikać może z obecności grup hydroksylowych i karboksylowych będących wynikiem obecności ekstraktu rozmarynu.

Tabela 1. Wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz pracy międzyfazowej. Objasnienia symboli w tekście.

Kompozyt	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-	$\gamma^{całkowita}$	$W_{s/rbc}$	$W_{s/p}$
PLA	25,65	1,75	0,06	12,45	27,40	-8,95	-109,6
PLA/0,25R	28,46	3,31	0,62	7,22	32,69	1,43	-107,1
PLA/0,50R	30,41	4,23	0,11	24,01	33,72	-2,11	-90,5
PLA/0,75R	40,17	5,41	0,33	22,22	45,58	10,8	-74,1
PLA/PEG	39,17	1,92	0,03	34,91	41,09	4,54	-69,6
PLA/PEG/0,50R	33,64	13,95	1,27	38,25	47,59	12,3	-71,5

Obliczone parametry $W_{s/p}$ (ujemne) wskazują na przewagę energii kohezji nad adhezji przy kontakcie płytek krwi z kompozytami, sugerując minimalizację adhezji pomiędzy płytkami o powierzchnią kompozytu i w efekcie unikanie powstania skrzepów.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji należy uznać:

- Uzyskanie kompozytów opartych o surowce ze źródeł odnawialnych o polepszonych właściwościach elastycznych (obniżony moduł Young'a, wzrost wydłużenia względnego, względem matrycy PLA), niskiej przepuszczalności gazów, niskiej migracji biododatku, co czyni je potencjalnymi kandydatami

jako substytutów tworzyw poliolefinowych w niektórych aplikacjach przemysłu opakowaniowego (w tym do żywności);

- Wykazanie właściwości antybakteryjnych oraz biokompatybilności w testach *in vitro*, co potencjalnie rozszerza pole aplikacji badanego materiału, do inżynierii tkankowej (opatrunki, leczenie ran, rusztowania, kontrolowane uwalnianie leków);

Publikacja A5

Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, **Karol J. Leluk**

Man-made and natural fibres as a reinforcement in fully biodegradable polymer composites: a concise study. *Journal of Polymers and the Environment*. 2018, vol. 26, nr 12, s. 4360-4368, <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1301-9> [załącznik 4, poz. **A5**]

Problemem inspirującym powstanie publikacji było wykonanie **biokompozytu** – opartego na **matrycy i napelniaczu ze źródeł odnawialnych**, który spełniałby stawiane przed nim oczekiwania względem właściwości fizyko mechanicznych, najlepiej konkurencyjnych w odniesieniu do ropopochodnych kompozytów termoplastycznych. Ze względu na fakt że biokompozyt polimerowe oparte na matrycy wykonanej z jednego tworzywa wykazują mocno ograniczone właściwości, pod uwagę wzięto wykonanie mieszaniny jako bazy do dalszych modyfikacji. Z tego względu przedmiotem badań były kompozycje oparte na mieszaninie **PLA** i **PBS**, napelniane włóknami **lnu**, **konopi** i **Cordenki** (jako przedstawiciela włókna syntetycznego) w ilościach 10%, 30%, 50%. Ze względu na wykonanie kompozytów wzmacnianych włóknem ciętym (o współczynniku proporcji przekraczającym 10) jako podstawowe dane do interpretacji przyjęto wyniki pomiarów wytrzymałościowych. Korelacja danych do modelu zmodyfikowanej reguły mieszanin (zależność opisana poniżej) była zadowalająca w zakresie napelnieni do 30%. Powyżej tej wartości model proporcjonalny przeszacowywał estymowaną wielkość fizyczną ze względu na brak informacji dotyczących osłabienia oddziaływań międzyfazowych. To zjawisko (osłabienia oddziaływania na granicy fazy matryca – włókno) powoduje powstanie znanego efektu nieciągłości i zaburzenie mechanizmu przenoszenia obciążenia pomiędzy fazami.

$$Y_c = (\eta_1 * \eta_0 * Y_f - Y_m) * V_f + Y_m$$

gdzie: Y – moduły sprężystości (m – matrycy, f – napelniacza, c – kompozytu), V_f – objętość napelniacza, η_0 – wskaźnik orientacji włókna, η_1 – wskaźnik geometryczny włókna (przyjęty za równy 1 ze względu na wysoką wartość współczynnika proporcjonalności włókien)

W kompozytach zaobserwowano wzrost wartości wytrzymałości na zrywanie, przy czym największe przyrosty tego parametru wystąpiły dla kompozytu napelnianego włóknami Cordenki. Podobnie w przypadku udarowości (Charpy), kompozyty napelniane Cordenką wykazywały najwyższą wartość tego parametru wśród wszystkich trzech rodzajów kompozytu, przy czym dodatek 50% napelniacza skutkowało podwojeniem wartości mierzonej dla samej matrycy. Modyfikacja matrycy polimerowej poprzez wprowadzenie celulozowych włókien syntetycznych prowadziła do zmian w jakości powierzchni kompozytu, co zostało potwierdzone w analizie wyników badań mikroskopu elektronowego i swobodnej energii powierzchniowej przeprowadzonych przez habilitanta. Zmiany te zachodziły w kierunku diametralnie odległym od tych obserwowanych dla kompozytów

napełnianych włóknami lnu czy konopi. I tak, dodatek włókien lnu i konopi powodował zwiększenie charakteru polarnego kompozytów (dla kompozytów napełnianych Cordenką – spadał). Jako przyczynę zachowania upatrywano także zmiany w morfologii powierzchni badanych przełomów, gdzie na zdjęciach wykonanych podczas badania SEM widoczne były charakterystyczne kępkę włókna syntetycznego, szczególnie w kompozycie o napełnieniu 50%.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji **A5** należy uznać:

- Uzyskanie biokompozytu wzmocnianego włóknem syntetycznym o korzystnych właściwościach mechanicznych (udarność);
- Mimo tworzenia kępek włókien (brak homogeniczności) biokompozyty napełniane Cordenką nadal wykazują właściwości mechaniczne (statyczne jak i udarność) bardziej korzystne niż odpowiadające mu kompozyty napełniane włóknami lnianymi bądź konopnymi;
- Niedoskonałość oddziaływań została wykazana na poziomie teoretycznym jak i w warunkach eksperymentalnych – mimo wystąpienia tego niekorzystnego zjawiska, włókna Cordenki nadal korzystnie poprawiają właściwości biokompozytów;

Publikacja A4

Karol J. Leluk, Joanna Ludwiczak, Stanisław Frąckowiak, Andrzej Iwańczuk

Effect of carbon black on thermal, mechanical and electroconductive properties of Mater-Bi® matrix. Cellulose Chemistry and Technology. 2020, vol. 54, nr 1/2, s. 119-123, <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.14> [załącznik 4, poz. **A4**].

Przedmiotem badawczym poruszonym w publikacji było określenie przydatności kompozytów elektroprzewodzących wykonanych na bazie surowca odnawialnego do aplikacji opakowaniowych. Jako matrycy użyto komercyjnie dostępnego i wykorzystywanego tworzywa **Mater-Bi®**, a modyfikatorem właściwości przewodzących była sadza. Badania prowadzone były w aspekcie wykonania i przetestowania materiału do wykonania opakowań do żywności, które można wykorzystać w procesie dezaktywacji mikroorganizmów pulsacyjnym polem elektrycznym (PEF). Metoda ta polega na poddaniu przechowywanego produktu żywnościowego krótkotrwałemu działaniu impulsu pola elektrycznego (rzędu maksymalnie kilkudziesięciu mikrosekund) o znacznym natężeniu rzędu kilkudziesięciu kV/cm. Ilość i kształt impulsów jest modyfikowana w zależności od rodzaju przechowywanego produktu i celu procesu. W tym celu koniecznym jest by materiał opakowaniowy wykazywał się następującymi cechami: odpowiednią elastycznością (domyślnie: porównywalną z folią LDPE), wytrzymałością na rozciąganie (na poziomie folii opakowaniowych wykonanych z polietylenu) oraz niską rezystywnością. Wszystkie trzy parametry są podstawowymi wymaganiami stawianymi przed materiałem opakowaniowym, stąd wybór matrycy Mater-Bi® podyktowany był jej właściwościami mechanicznymi oraz rodzajem komponentów (użytych do wytworzenia komercyjnego produktu) a napełniacza – właściwościami przewodzącymi i ceną. Ten ostatni aspekt odegrał znaczną rolę ze względu na prowadzenie prac w ramach projektu wymienionego w załączniku 4 poz. **P2** i komercjalizacji wyników prac przez Lidera konsorcjum.

Dodatek sadzy w ilości powyżej progu perkolacji (1% masowo) spowodował obniżenie wytrzymałości na rozciąganie o ok. 30% do 15 MPa, wzrost modułu Younga o 10% (do ok 140 MPa) i spadek o 50% wydłużenia przy zerwaniu (do 250%). Co ciekawe, dodatek kolejnych porcji sadzy (badania prowadzono także dla kompozytów zawierających 2% i 4% napelniacza) mimo dalszego obniżenia elastyczności (finalny wzrost modułu o 40%, spadek wydłużenia przy zerwaniu o 60% wartości początkowej) nie powodował znaczących zmian wytrzymałości na rozciąganie.

Badania relaksacji dielektrycznej przeprowadzone przez habilitanta wykazały istnienie dobrze wykształconego obszaru w kompozytach zawierających 2% i 4% sadzy. Analiza przebiegu krzywych reprezentujących zmiany części rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej wskazuje jasno na istnienie procesu z maksimum położnym przy 10kHz (kompozyt zawierający 2% sadzy) i 35 kHz (kompozyt zawierający 4% sadzy). Wartość strat dielektrycznych dla tych częstotliwości była odpowiednio dwu- i sześciokrotnie wyższa niż niemodyfikowanej matrycy. Nie zaobserwowano żadnych przejawów procesów relaksacyjnych dla niższej napelnianego kompozytu. Obecność maksimum na krzywej strat oraz jego przesłajenie do wyższych częstotliwości wraz z ilością napelniacza daje obiecujący wynik do prac nad układem selektywnie pochłaniającym promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości sterowanych ilością (ekonomicznie korzystnego) napelniacza.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji **A4** należy uznać:

- Wykonanie kompozytu z matrycą polimerową opartą o surowce odnawialne, wykazującym korzystne właściwości elektryczne przy akceptowalnych właściwościach wytrzymałościowych do zastosowań opakowaniowych;
- Niski poziom perkolacji otrzymanych kompozytów;
- Możliwość sterowania właściwościami dielektrycznymi, tj.: położeniem maksimum oraz kształtem pasma absorpcji promieniowania elektromagnetycznego, zawartością napelniacza. Stwarza to potencjalne możliwości aplikacyjne jako relaksorów dielektrycznych opartych na materiałach odnawialnych;

Publikacja A3

Joanna Ludwiczak, Stanisław Frąckowiak, **Karol J. Leluk**

Study of thermal, mechanical and barrier properties of biodegradable PLA/PBAT films with highly oriented MMT. *Materials*. 2021, vol. 14, nr 23, art. 7189, s. 1-12, <https://doi.org/10.3390/ma14237189> [załącznik 4, poz. **A3**]

Praca opiera się na koncepcie poprawy właściwości użytkowych biokompozytów opartych na **PLA** (80% udziałów) domieszkowanych 20% **PBAT**. Jako napelniacza funkcjonalnego użyto organicznie modyfikowanego montmorylonitu (zawierającego ok. 30% soli amonowej). Celem poprawy oddziaływań międzyfazowych zastosowano 1% dodatku modyfikatora (**CE**) materiału matrycy biokompozytu. Próbkę otrzymywane były w procesie kalandrowania.

Zastosowanie dodatków modyfikujących (**MMT** i **CE**) doprowadziło do otrzymania układu wieloskładnikowego o korzystnych właściwościach wytrzymałościowych w aspekcie wytwarzania folii, szczególnie w przypadku wysoko napelnianego układu (5% napelniacza). W szczególności, materiał charakteryzował się wydłużeniem

względny na poziomie ok. 40%, wytrzymałością na rozciąganie ok. 50 MPa i modułem sprężystości ok. 1800 MPa. W kontekście faktu że jest on wykonany z surowców odnawialnych, wyniki te można uznać za zadowalające w aspekcie aplikacyjnym. Zadowalający stopień mieszalności komponentów został poparty w badaniu mikroskopowym SEM. Obserwacje prowadzone dla powierzchni materiału w płaszczyźnie równoległej i prostopadłej do osi wytłaczania (kalandrowania) wykazały dobrą dyspersję napelnacza. Dodatkowo, wartym zaznaczenia jest fakt uzyskania korzystnych właściwości barierowych (wobec tlenu), gdzie już 20% dodatek PBAT przełożył się na ponad dwukrotną redukcję przepuszczalności, a obecność MMT spowodowała dalsze obniżanie wartości tego parametru.

Interesującym jest także zmiana charakteru powierzchni – swobodnej energii powierzchniowej w analizowanych kompozycjach, przeprowadzonej przez habilitanta. Wprowadzenie domieszki 20% PBAT do matrycy PLA spowodowało znaczny przyrost swobodnej energii powierzchniowej głównie za sprawą diametralnego wzrostu komponentu związanego z oddziaływaniami kwasowo – zasadowymi. Obliczona polarność powierzchni wynosiła ok. 30% co stanowiło ok. 15-krotny wzrost w stosunku do niemodyfikowanych PLA i PBAT. Obserwowany synergistyczny efekt związany jest z pojawieniem się dodatkowego oddziaływania pomiędzy komponentami mieszaniny, będącym wynikiem zachodzącej reakcji transestryfikacji, co zostało potwierdzone także przez innych badaczy. Wprowadzenie do mieszaniny PLA/PBAT komponentu wydłużającego łańcuch (CE), dodatkowo wzmacnia dystrybuującą gęstość elektronową powodując obniżenie charakteru polarnego całego układu, co również zostało zaobserwowane przez innych badaczy.

Z kolei wprowadzenie komponentu nieorganicznego (modyfikowanego montmorylonitu) do mieszaniny doprowadziło do dramatycznego spadku zarówno całkowitej SFE jak i polarności próbek już w kompozycie o najniższej zawartości montmorylonitu. Zachowanie to jest łączone z budową chemiczną napelnacza i również zostało potwierdzone przez innych badaczy. Podobną zgodność wyników eksperymentalnych z oczekiwanym rezultatem przyniosło badanie barierowości wobec tlenu (również przeprowadzone przez habilitanta), gdzie wykazano prawie trzykrotną redukcję parametru w kompozytach, w odniesieniu do niemodyfikowanej matrycy PLA.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji **A3** należy uznać:

- Dodatek komponentu elastycznego (PBAT) obniża kruchość matrycy PLA;
- Wprowadzenie komponentu PBAT (20%) do matrycy PLA znacznie obniżyło przepuszczalność wobec tlenu. Najniższą wartość przepuszczalności wykazały kompozyty z dodatkiem 5% montmorylonitu modyfikowanego organicznie, mimo że zadowalające efekty otrzymano już przy najniższej zawartości dodatku nieorganicznego;
- Proces mieszania w stopie i orientacji wytłoczyny (kalandrowanie) skutkowało utworzeniem galerii napelnacza (MMT) w otrzymanych foliach. Obraz SEM potwierdził także mieszalność komponentów matrycy PLA i PBAT;
- Wszystkie prowadzone modyfikacje (mieszaniny, dodatki, proces orientowania) doprowadziły do polepszenia właściwości użytkowych badanych materiałów w kontekście zastosowań do aplikacji opakowaniowych (elastyczność, przepuszczalność, wytrzymałość);

Publikacja A2

Karol J. Leluk, Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Tomasz Rydzkowski, Vijay Kumar. Thakur

The impact of filler geometry on polylactid acid-based sustainable polymer composites. *Molecules*. 2021, vol. 26, nr 1, art. 149, s. 1-19, <https://doi.org/10.3390/molecules26010149> [załącznik 4, poz. **A2**]

Problemem badawczym poruszonym w pracy był wpływ naturalnych napełniaczy o różnej geometrii (współczynnika proporcji) na właściwości **biokompozytu PLA**. Pod uwagę wzięto włókna **celulozy** o długościach 60 μm , 700 μm i 900 μm , **węglan wapnia** oraz **montmorylonit** (modyfikowany oktadecyl aminą). W wyborze napełniacza kierowano się przede wszystkim aspektem ekonomicznym, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie szerokiego spektrum budowy przestrzennej, i tak: włókna celulozy traktowane były jako pręty (o różnym współczynnika proporcji), węglan wapnia – sześciian (średni rozmiar cząstek 40 μm), natomiast montmorylonit – układ płytkowy (w szczególności po eksfoliacji – dwuwymiarowy). Oczywiście, czynnikiem różnicującym wymienione materiały jest także ich natura chemiczna: od polarnych włókien celulozy po montmorylonit o silnym charakterze apolarnym. Wybraną matrycą było PLA, ze względu na znaczną popularność tego tworzywa a co za tym idzie czynnik ekonomiczny.

Kompozyty przygotowano w procesie mieszania w stopie, używając 5% i 30% dodatku napełniacza celulozowego, oraz 5% węgla wapnia i montmorylonitu, a następnie poddano szeregowi badań właściwości fizykomechanicznych.

Kompozyty napełniane celulozą wykazywały typowe zachowanie w testach statycznego rozciągania i zginania dla kompozytów wzmacnianych włóknem, jak np.: wzrost modułu Younga proporcjonalny do ilości napełniacza oraz długości włókna. Kompozyty zawierające napełniacze nieorganiczne, również wpisywały się w dobrze opisany w literaturze trend zmian parametrów wytrzymałościowych. Interesujące wyniki dało badanie udarności Charpy – wprowadzenie 5% włókien powodowało wzrost udarności, która spadała do wartości dwukrotnie niższej dla kompozytów zawierających 30% napełniacza. Wyjaśnienie tego zjawiska można oprzeć na wynikach pomiarów DSC, gdzie zaobserwowano znaczny wzrost krystaliczności wysokonapełnionych próbek, oraz fakcie znacznie lepszej dyspersji w matrycy włókien krótkich. W kompozytach włóknistych o wysokim stopniu napełnienia, oprócz wspomnianej wysokiej krystaliczności, w wyniku ograniczeń sterycznych utrudniających efektywne mieszanie i dyspersję napełniacza, mogą występować kępkki włókien, a nie pojedyncze, dobrze rozdystrybuowane elementy. W takim układzie propagacja naprężeń (pojawiająca się w wyniku obciążenia dynamicznego) nie występuje przez pojedyncze włókna, co prowadzi do opisanych powyżej obserwacji. Dla dokładnego określenia stopnia krystaliczności, w pracy dokonano obliczeń tego parametru dwoma metodami: prostszą wyłącznie z entalpii krystalizacji i bardziej dokładną która bierze pod uwagę także ciepło procesu mięknięcia, krystalizacji jak i ułamek masowy matrycy polimerowej w kompozycie. Potwierdzają one brak znaczącego wpływu na stopień krystaliczności w przypadku kompozytów z 5% udziałem napełniacza celulozowego. Dopiero wprowadzenie 30% napełniacza powoduje jakościowo znaczny wzrost parametru niezależnie od metody obliczeniowej. Bezpośrednią przyczyną takiego stanu rzeczy jest zwiększenie ciepła krystalizacji, co może być odzwierciedleniem kreowania większej liczby zarodków krystalizacji w materiale, zachodzącej na granicy międzyfazowej matryca – napełniacz. Jednakże, należy mieć na uwadze możliwość istnienia efektu konkurencyjnego – zwiększenie ilości napełniacza o geometrii pręta wpływa negatywnie na stopień krystaliczności kompozytu, co było przedmiotem dyskusji we

wcześniejszej pracy, nie ujętej w cyklu publikacji [załącznik 4, poz. **B13**], który jak widać w tym przypadku jednak nie odegrał znaczącej roli.

Wysoką wartość udarności zaobserwowano także dla kompozytu napenionego 5% węgla wapnia, co potwierdziło dostępne w literaturze doniesienia wiążące kształt tego napelnacza z jego rolą w zwiększeniu udarności Charpy.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji **A2** należy uznać:

- współczynnik kształtu wprowadzonego napelnacza odgrywa kluczową rolę w końcowych właściwościach materiału, zgodną z przewidywaniami teoretycznymi;
- zgodnie z oczekiwaniami – uzyskano polepszone właściwości barierowe dla kompozytów napelnianych montmorylonitem (przy akceptowalnym poziomie właściwości wytrzymałościowych), czyniąc materiał atrakcyjny pod kątem aplikacji opakowaniowych;

Publikacja A1

Karol J. Leluk

Cold Plasma Surface Modification of PLA and LDPE Polymer Plastics. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023, vol. 25, s. 141-147, <https://doi.org/10.54740/ros.2023.014> [załącznik 4, poz. **A1**]

W pracy przedstawiono efekty modyfikacji powierzchniowej (aktywacji) dwóch materiałów polimerowych (**PLA** i **LDPE**) z wykorzystaniem plazmy niskotemperaturowej. Przedmiotem zainteresowania był wpływ czterech procesów obróbki powierzchniowej różniących się warunkami procesowymi na polikwas mlekowy. LDPE, jako przedstawiciel popularnego materiału stosowanego w przemyśle opakowaniowym, posłużył jako próba odniesienia. Jako czynnika modyfikującego wykorzystano procesy zachodzące podczas wyładowań w następujących gazach: argonie, azocie, tlenie i powietrzu, przy czym pozostałe parametry (jak moc źródła, czas ekspozycji, ciśnienie, przepływ gazu) nie ulegały zmianie. Analiza powierzchni materiałów polimerowych była przeprowadzana przed i po modyfikacji za **AFM** oraz zwilżania (analit: woda destylowana). Dodatkowo, celem określenia dynamiki zmian zachodzących na powierzchni zmodyfikowanych materiałów, pomiar kąta zwilżania dla wody prowadzono w wybranych odstępach czasowych (maksymalnie do 160h po procesie modyfikacji). Próbkę do badań przygotowane były w procesie prasowania i z tak przygotowanych wyprasek wycięto mniejsze płytki (20x20 mm) które poddano procesowi modyfikacji.

Modyfikacja plazmowa doprowadziła, niezależnie od użytego gazu, do zmian na powierzchni analizowanych materiałów, jednakże ich ilościowy charakter był zróżnicowany w zależności od rodzaju źródła wyładowań plazmowych. I tak, w przypadku PLA, największe zmiany zaobserwowano prowadząc proces w obecności powietrza (wzrost RMS z 8,3 do ok. 114), następnie azotu (wzrost RMS do ok. 98), tlenu (wzrost RMS do ok. 83) i argonu (53 jednostki RMS), wskazując na znaczne zwiększenie stopnia chropowatości powierzchni modyfikowanego materiału. Co istotne, analiza AFM przeprowadzona powtórnie na tych samych próbkach po ok. 240 godzinach od modyfikacji wykazała stabilność tych zmian pod kątem morfologicznym. Odczytane parametry RMS wynosiły odpowiednio: 121, 85, 103, 64. Te, nadal bardzo wysokie, wartości wskazują jasno na diametralną, trwałą (10 dni) zmianę w morfologii powierzchni. Na tym tle odmiennie prezentują się wyniki zwilżalności. W przypadku tej analizy, największą zmianę widać dla procesu wspomaganego azotem (spadek

zwilżalności z ok 60 ° do 8 °), w dalszej kolejności były argon (spadek do ok. 15 °), powietrze (spadek do ok. 22 °) i tlen (spadek do ok 50 °). Oczywiście tak niskie wartości kąta zwilżania (wskazujące na silnie hydrofilowy charakter) nie utrzymywały się długo i w większości przypadków już po godzinie zwilżalność reprezentowała poziom zbliżony do tego sprzed procesu. W każdym z czterech przypadków charakter zmian spadku hydrofilowości był płynny, asymptotycznie dążąc do stałej wartości (nie koniecznie równej tej dla próbki niemodyfikowanej). Jako że kąt zwilżania jest odbiciem zmian właściwości fizycznych (morfologia) oraz chemicznych (nowe wiązania i grupy, także o silnym donorowym charakterze), dając uśredniony obraz jakości modyfikowanej powierzchni, interpretację wygodnie jest prowadzić w połączeniu z techniką badającą bezpośrednio jeden z tych parametrów (jak wspomniany AFM). W tej sytuacji, przy braku zmian fizycznego charakteru, zmiana kąta zwilżania związana musi być z wygaszaniem procesów chemicznych. O ile dramatyczna zmiana następuje w przeciągu godziny, to należy mieć na uwadze że proces ten (szczególnie w przypadku plazmy powietrznej czy tlenowej) rozciąga się na dłuższy przedział czasowy. Daje to informacje od strony aplikacyjnej, na temat prowadzenia procesu nanoszenia warstw gdzie jakość procesu zadrukowania (i trwałość tak naniesionej warstwy kryjącej) zależy od chropowatości jak i stopnia adhezji międzyfazowej.

Użyty jako próba odniesienia LDPE, również został poddany modyfikacjom jednakże w tym przypadku ich wpływ na chropowatość był znacznie mniejszy (maksymalnie zwiększając RMS z 9 do 22 jednostek) a także końcowej wartości kąta zwilżania, oscylującej w granicach 50 – 60 °.

Za najważniejsze aspekty poznawcze publikacji **A1** należy uznać:

- Modyfikacja plazmowa prowadzi do fizycznych i chemicznych zmian materiałów, różnicując pod względem użytego do procesu gazu;
- W zależności od użytego gazu, zmienia się czas po którym powierzchnia materiału wraca do formy stabilnej; Stabilizacja materiału zawsze miała przebieg asymptotyczny;
- Ze względu na charakter zaobserwowanych zmian, wydaje się zasadnym sformułowanie wniosku o przewadze efektów modyfikacji fizycznej (w PLA nad LDPE) oraz zmianach chemicznych w LDPE górujących na zmianami fizycznymi;

Podsumowanie:

- biokompozyty polimerowe są w stanie częściowo zastąpić materiały ze źródeł nieodnawialnych, szczególnie w sektorze opakowaniowym (**A1 – A7**);
- substytucja może być rozważona w aspekcie wybranych, specyficznych właściwości – brak jest uniwersalnego charakteru jak w przypadku tworzyw ze źródeł nieodnawialnych (**A2 – A7**);
- doświadczalnie udowodniono otrzymanie biokompozytów opartych o surowce odnawialne charakteryzujące się bardziej korzystnymi właściwościami niż komponenty wyjściowe (**A2 – A7**);
- ze względu na właściwości, większość z otrzymanych biokompozytów jest potencjalnymi materiałami do zastosowań w przemyśle opakowaniowym, także aktywnych opakowań do żywności; za aspektem aplikacyjnym przemawia również korzyść ekonomiczna (w porównaniu do innych biokompozytów) (**A1 – A7**);

- korzystnym, z punktu widzenia właściwości materiałowych, jest stosowanie komponentów otrzymanych na drodze syntezy z surowców odnawialnych (jak np.: włókna) lub procesów fizycznych (ekstrakcja) (A2, A7);
- stosowanie mieszanin matryc polimerowych, oprócz modyfikacji właściwości mechanicznych, może także pozytywnie wpływać na inne właściwości użytkowe, jak np.: barierowość wobec gazów, bez konieczności stosowania kosztownych napełniaczy mineralnych (A2, A3);
- modyfikacja właściwości powierzchniowych jest pochodną zmian zachodzących w biokompozycie/biopolimerze, ale nie jest możliwym proste i pewne przewidzenie ich kierunku (A1 – A7);
- dane z badań zwilżalności mogą stanowić podstawę do przeprowadzenia testów in vitro w kontekście spodziewanych oddziaływań zachodzących na granicy faz kompozyt – medium zewnętrzne (A6);

Literatura:

Plastics Europe – Annual report „Plastics – The Facts 2022”, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>, dostęp on-line 20-08-2023r.

European Bioplastics e.V. Market Update, press release, https://docs.european-bioplastics.org/PR/2020/EUBP_PR_Market_Data_2020_20201202.pdf#:~:text=With%20a%20view%20to%20regional%20capacity%20development%2C%20Asia,grow%20to%20up%20to%2028%20percent%20by%202025., dostęp 20-08-2023r.

„Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030”, Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne w dniu 25 września 2015 r. A/RES/70/1, przekazano do ogólnego rozpowszechniania 21 października 2015 r.

Mascheroni, E.; Guillard, V.; Nalin, F.; Mora, L.; Piergiovanni, L. Diffusivity of propolis compounds in polylactic acid polymer for the development of antimicrobial packaging films. *J. Food Eng.* 2010, 98, 294–301.

Al-Itry, R.; Lamnawar, K.; Maazouz, A. Improvement of Thermal Stability, Rheological and Mechanical Properties of PLA, PBAT and Their Blends by Reactive Extrusion with Functionalized Epoxy. *Polym. Degrad. Stab.* 2012, 97, 1898–1914.

Ptiček Siročić, A.; Hrnjak-Murčić, Z.; Jelenčić, J. The Surface Energy as an Indicator of Miscibility of SAN/EDPM Polymer Blends. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2013, 27, 2615–2628.

Anyszka, R.; Bieliński, D.M.; Pędzich, Z.; Szumera, M. Influence of Surface-Modified Montmorillonites on Properties of Silicone Rubber-Based Ceramizable Composites. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2014, 119, 111–121.

Liu, D.Y.; Yuan, X.W.; Bhattacharyya, D.; Eastal, A.J. Characterisation of Solution Cast Cellulose Nanofibre—Reinforced Poly(Lactic Acid). *Express Polym. Lett.* 2010, 4, 26–31.

Asadi, Z.; Javadi, A.; Mohammadzadeh, F.; Alavi, K. Investigation on the Role of Nanoclay and Nano Calcium Carbonate on Morphology, Rheology, Crystallinity and Mechanical Properties of Binary and Ternary Nanocomposites Based on PLA. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2020, 1–16.

5. Informacja o wykazaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

5.1 Przed uzyskaniem stopnia doktora

Po ukończeniu w 2000r. Liceum Ogólnokształcącego im. Jana III Sobieskiego w Oławie, w klasie o profilu o rozszerzonym języku angielskim, podjąłem jednolite studia magisterskie na Wydziale Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego. W ramach studiów miałem możliwość zapoznania się z technikami badania struktur materiałów na poziomie cząsteczkowym oraz zdobyłem wiedzę i umiejętności dotyczące istnienia zależności pomiędzy budową cząsteczkową a właściwościami makroskopowymi materiałów (w szczególności fazy stałej) oraz ich przewidywania. Będąc na piątym roku studiów, stałem się beneficjentem programu wymiany międzynarodowej (Erasmus-Socrates) dzięki czemu uzyskałem możliwość wyjazdu do Georg-August Universität w Getyndze i tam (przy wsparciu finansowym Fundacji Volkswagena) prowadzenia badań nad ciekłymi mieszaninami krytycznymi w zespole prof. Udo Kaatze [załącznik 4, poz. S'1]. Efektem prac jest publikacja naukowa wymieniona w załączniku 4, poz. C2. Wydarzenia te wzbudziły moje naukowe zainteresowanie możliwością wykorzystania wyników badań w praktycznych zastosowaniach, czego pierwszym dowodem była praca magisterska zrealizowana w Zespole Chemii Fizycznej, pod kierownictwem dr hab. Kazimierza Orzechowskiego, prof. UW, dotycząca wpływu rodzaju i budowy materiału o właściwościach ferrimagnetycznych na absorpcję promieniowania elektromagnetycznego z zakresu 1 – 1000 MHz. Materiał ten został opracowany w Zespole Chemii Fizycznej pod kierownictwem prof. dr hab. Huberta Artura Kołodzieja. W zakresie pracy znalazło się badanie składowej rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej oraz magnetycznej, pod kątem maksymalizacji strat (części urojonej składowej magnetycznej i elektrycznej) oraz na tej podstawie określenia przydatności materiału jako potencjalnego komponentu do ekranowania obiektu przed promieniowaniem elektromagnetycznym. Zainteresowanie materiałami kompatybilnymi elektromagnetycznie przełożyło się na kontynuowanie prac badawczych jako uczestnika Studiów Doktoranckich, które prowadziłem nadal pod kierownictwem dr hab. Kazimierza Orzechowskiego, prof. UW. W tym samym Zespole. Praca doktorska dotyczyła oceny możliwości wykorzystania naturalnych materiałów warstwowych – minerałów ilastych, jako nośników substancji aktywnej pochłaniającej promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości 100 Hz – 4 GHz. W tym celu nawiązana została współpraca z dr inż. Tadeuszem Słonką z Wydziału Chemii Politechniki Wrocławskiej. W ramach współdziałania, na Politechnice Wrocławskiej przeprowadzano interkalację kaolinitu wybranymi cząsteczkami organicznymi o zróżnicowanym momencie dipolowym i właściwościach polarnych. Tak przygotowane materiały poddawałem badaniu właściwości dielektrycznych (tylko zespolona przenikalność elektryczna) w w/w zakresie częstotliwości. Efekty badań zostały ujęte w publikacjach wymienionych w załączniku 4, poz. C1, C3 – C5. Ze względu na potencjał aplikacyjny wyników badań, skupiłem się w swojej pracy na ocenie zmiany badanego parametru – zespolonej przenikalności elektrycznej, także w

domenie temperaturowej. Było to istotne ze względu na wzrost temperatury absorbera podczas jego pracy (pochlaniań promieniowania) co mogło prowadzić do zmian strukturalnych interkalatu, przekładających się na zmianę tłumienia, w tym deinterkalacji substancji aktywnej. W tym celu, przy wsparciu Promotora, skonstruowałem w zakresie własnych sił i środków przystawkę do posiadanego komercyjnego mostka RLC firmy Hewlett-Packard, która umożliwiła w czasie rzeczywistym badanie widma dielektrycznego materiałów sypkich w zakresie od temperatury otoczenia do +450 °C, co uważam za znaczne osiągnięcie konstrukcyjne mimo że takowe nie było przedmiotem rozprawy. Oprócz wykonania badań, w pracy zostało wykonane dopasowanie modeli teoretycznych do opisu zjawisk relaksacyjnych pozwalające na powiązanie budowy sypkiego układu warstwowego z właściwościami makroskopowymi. Efektem badań jest publikacja naukowa wymieniona w załączniku 4, poz. **B14**, oraz prezentacje na konferencjach krajowych i międzynarodowych [załącznik 4, poz. **K'2 – K'6**].

W latach 2007 - 2008r. zostałem wyróżniony rocznym stypendium w ramach programu Stypendium Prezydenta Miasta Wrocławia, za osiągnięcia wspierające rozwój regionu, a w roku 2008 uzyskałem środki finansowe na badania w ramach grantu wewnętrznego Wydziału Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego, przyznane w ramach VIII Konkursu Wewnętrznych Projektów badawczych. Pracę doktorską złożyłem w 2009r. i obroniłem we wrześniu 2009r. z wynikiem bardzo dobrym.

5.2 Po uzyskaniu stopnia doktora

Kontynuując zainteresowania w zakresie prowadzenia prac badawczych łączącego elementy materiałoznawstwa oraz ich aplikacyjnego charakteru, w październiku 2009r. podjąłem stosunek pracy na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Inżynierii Środowiska w **Centrum Doskonałości Materiałów Polimerowych i Recyklingu** prowadzonego pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marka Kozłowskiego.

5.2.1 Projekty

Jako asystent naukowy podjąłem się prac badawczych w ramach projektu „**Nowe przyjazne dla środowiska kompozyty polimerowe z wykorzystaniem surowców odnawialnych**” realizowanym w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka [załącznik 4, pozycja **P8**]. W ramach projektu opracowano napełniacze i wzmocnienia pochodzenia naturalnego do przetwórstwa z materiałami polimerowymi. Użyte matryce polimerowe stanowiły komercyjnie dostępne surowce z zasobów kopalnych (polietyleny, polipropylen, także szczepione bezwodnikiem) – jako odniesienie, oraz te ze źródeł odnawialnych, takie jak: skrobia (ziemniaczana, kukurydziana, pszeniczna), gliceryna, czy polikwas mlekowy. W ramach powierzonych mi obowiązków dokonywałem **charakterystyki właściwości mechanicznych kompozytów** (wytrzymałość na zerwanie/zginanie, udarność, twardość) oraz **ich właściwości powierzchniowych**. To drugie zadanie polegało na ocenie swobodnej energii powierzchniowej składowych kompozytu: napełniacza włóknistego i matrycy, jako parametru wspomagającego dobór odpowiednich par (o zbliżonych właściwościach powierzchniowych). W efekcie, badania te dały wynik w postaci zbioru danych umożliwiających **wstępną ocenę zgodności materiałów** (pod kątem maksymalizacji adhezji międzyfazowej) jeszcze przed umieszczeniem ich w urządzeniu przetwórczym i wykonaniu procesu wytłaczania. Co więcej, pomiar swobodnej energii powierzchniowej wytworzonych kompozytów dał także informację odnośnie zmian tychże właściwości po procesie przetwórczym i **podatności na procesy post-przetwórcze** (jak np.: zadrukowanie). Na podstawie analizy tych danych wnioskowano o zmianie

charakteru powierzchni wytworzonych nowych kompozytów polimerowych z surowców odnawialnych, co wobec braku innego narzędzia (jak np.: SEM) dało istotny wkład w prace projektowe. Wyniki działań zostały zaprezentowane na konferencjach naukowych [załącznik 4, poz. **K1 – K3**].

Tematyka badań powierzchni materiałów polimerowych stała się dla mnie na tyle interesująca, a uczestnictwo w projekcie B+R poszerzyło bazę kontaktów – także międzynarodowych, że w latach 2011 i 2012 uczestniczyłem w **dwóch stażach** realizowanych w jednostkach zagranicznych [załącznik 4, poz. **S2 i S3**], które umożliwiły mi zapoznanie się z technikami **modyfikacji powierzchni materiałów polimerowych** niedostępnymi w jednostce macierzystej. Oba wyjazdy realizowałem dzięki uczestnictwu zespołu w międzynarodowej sieci European Cooperation in Science and Technology, akcji Food and Agriculture (FA0904) „Eco-sustainable food packaging based on polymer nanomaterials”, w której to także pełniłem funkcję **zastępcy członka Komitetu Sterującego** w latach 2010 – 2014 [załącznik 4, poz. **II. 14**].

W ramach pierwszej misji (wg nomenklatury COST – Short Term Scientific Mission) w 2011 roku prowadziłem badania nad **modyfikacją plazmową materiałów polimerowych**. Bazą były próbki wytworzone w macierzystym laboratorium zarówno z surowców nieodnawialnych (PE, PP, PC, PA) jak i odnawialnych (PLA, PCL), natomiast proces modyfikacji i charakteryzacji prowadzony był w zespole prof. Hynka Biedermana w Instytucie Fizyki i Matematyki, Wydziału Fizyki Makromolekuł, Uniwersytet Karola w Pradze. Modyfikacja plazmowa przebiegała dwutorowo: jako **aktywacja powierzchni** czterema źródłami plazmy niskotemperaturowej (powietrzna, argonowa, azotowa i tlenowa) oraz poprzez napylenie plazmowe warstwy PTFE na powierzchni materiału polimerowego celem jej deaktywacji i redukcji porowatości. Analizy prowadziłem zarówno pod kątem zmian zwilżalności warstwy wierzchniej (w funkcji czasu) jak i mikroskopii sił atomowych (obrazowanie porowatości powierzchni). Oba te narzędzia umożliwiły ocenę stopnia modyfikacji jak i jej trwałości w funkcji czasu dla popularnych materiałów polimerowych szeroko stosowanych w branży opakowaniowej. Dodatkowo, chcąc zweryfikować stopień zmian chemicznych, wykonano analizę XPS. Efektem tych badań, oprócz raportu przedłożonego i zatwierdzonego przez Koordynatora STSM jest publikacja wymieniona w załączniku 4, poz. **A1** oraz prezentacja na konferencji [załącznik 4, poz. **K4**].

Kontynuacją tych badań była kolejna misja którą odbyłem w 2012r. w zespole prof. Rumiany Kotsilkovej, w Instytucie Mechaniki, Otwarte Laboratorium Mechaniki Eksperymentalnej, Bułgarska Akademia Nauk, Sofia, Bułgaria. W zakresie podjętych czynności leżały **badania nanoindentacyjne powierzchni modyfikowanych materiałów polimerowych** pokrytych warstwą PTFE w ramach **stażu odbywanego w Republice Czeskiej**. Oprócz określenia zmian chropowatości powierzchni po około rocznym sezonowaniu próbek, dokonano oceny właściwości mikromechanicznych (moduł Younga, twardość) i weryfikowano te dane z danymi makroskopowymi. Efekty prac zostały ujęte na konferencji [załącznik 4, pozycja **K5**]. Doświadczenie zdobyte podczas misji jest istotne z punktu widzenia:

- Osobistego przeprowadzenia modyfikacji techniką zimnej plazmy;
- Osobistego przeprowadzenia charakterystyki właściwości warstwy wierzchniej po modyfikacji;
- Zrozumienia charakteru procesów od strony fizykochemicznej zachodzących w warstwie wierzchniej a przekładających się bezpośrednio na funkcjonalność materiałów polimerowych poddanych modyfikacji;

W szczególności ostatni aspekt jest szczególnie przydatny w zakresie opakowań do żywności (pod kątem zmian barierowości wobec gazów) jak i zadrukowywania w celach reklamowych czy identyfikacyjnych (nanoszenia oznaczeń LOT, kodów kreskowych).

Metody modyfikacji materiałów polimerowych stanowiły istotny aspekt badawczy w kolejnych projektach badawczych realizowanych w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. „**Materiały polimerowe otrzymywane innowacyjnymi technikami przetwórstwa odpadów z elektroniki i samochodów**” [załącznik 4, poz. **P7**], to przedsięwzięcie w ramach którego poświęciłem się badaniom nad zastosowaniem strumieni wybranych materiałów polimerowych z odpadów pochodzących z zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych (ZSEiE) oraz samochodów wycofanych z eksploatacji (SWE), do ponownego przetwórstwa. Te dwa strumienie odpadów polimerowych już ówczas zwracały uwagę przede wszystkim ze względu na wolumen jak i różnorodność materiałową, często nie mogących być współprzerwanymi (ze względu na brak kompatybilności i dodatki stosowane do modyfikacji tworzyw w trakcie wytwarzania detalu). Stąd w projekcie podjąłem się zadania wydzielenia poszczególnych strumieni (z podziałem na frakcje PE/PP, ABS, PS, PC, PUR, miks) a następnie ich charakterystyce ze względu na miejsce poboru prób (stacje demontażu) i przetwórstwu pod kątem pozyskania wartościowych produktów końcowych o możliwie wysokiej wartości dodanej. W tym celu jako wykonawca podjąłem się wsparcia w zakresie **przetwórstwa mieszanin polimerowych** oraz badania **właściwości powierzchniowych** surowców i powstałych z nich produktów. Dodatkowo wykonywałem pomiary wytrzymałościowe i okazjonalnie barierowe przetworzonych mieszanin i kompozytów. Badania wykazały zróżnicowanie właściwości fizykomechanicznych strumieni w ramach źródła pochodzenia, natomiast mieściły się one nadal w akceptowalnych (tj.: umożliwiających identyfikację prostymi metodami – np.: flotacyjną) granicach uzasadniając ekonomiczny sens przedsięwzięcia. Co więcej, w ramach przeprowadzonych w projekcie testów wytrzymałościowych na mieszaninach PP/PE sporządzonych z SWE stwierdzono niewystępujące wcześniej ponadnormatywne wydłużenie względne dla tego typu układów. Fenomen ten stał się przedmiotem zgłoszenia patentowego jak i został opisany w monografii [załącznik 4, poz. **R4**], czy będących wskaźnikiem projektowym – karcie materiałowej produktu.

Ze względu na zainteresowania aplikacyjne materiałami ze źródeł odnawialnych (które przejawiało się już podczas pracy doktorskiej) moje zainteresowanie skierowało się w stronę polikwasu mlekowego i jego aplikacji medycznych. Stąd w latach 2012 – 2013 brałem udział w kolejnym projekcie z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka: „**Polimerowe chirurgiczne systemy resorbowalne z pamięcią kształtu**” [załącznik 4, poz. **P6**]. W ramach tego przedsięwzięcia poszukiwane były materiały spełniające następujące kryteria: resorbowalny, posiadający pamięć kształtu, z temperaturą przemiany fazowej w bliskości temperatury fizjologicznej ustroju żywego. W tym celu przygotowane przez Lidera projektu mieszaniny i kopolimery na bazie kwasu mlekowego zostały poddane badaniom wytrzymałościowym, powierzchniowym, temperatury przejścia fazowego i zdolności powrotu do pierwotnego kształtu (wraz z pomiarem siły generowanej w procesie). Ocena **właściwości powierzchniowych** – swobodnej energii powierzchniowej materiałów, pozwoliła na określenie ich kompatybilności z tkanką żywą, jak i powinowactwa do płynów ustrojowych czy – pośrednio – wnioski na temat porowatości powierzchni. Wynikiem przeprowadzonych przeze mnie działań było **określenie najbardziej korzystnego pod względem aplikacyjnym** rezomeru z punktu widzenia temperatury przejścia fazowego, właściwości wytrzymałościowych i powierzchniowych. Wyniki prac zostały upublicznione w czasopiśmie naukowym [załącznik 4, poz. **B12**] i konferencji [załącznik 4, poz. **K6**].

Z uwagi na posiadane doświadczenie w zakresie aplikacji materiałów z surowców odnawialnych (w szczególności polikwasu mlekowego) w 2022r. zostałem zatrudniony w projekcie LIDER (XI edycja): „**Opracowanie innowacyjnych, wymiennych struktur energochłonnych kasków ochronnych na bazie tworzyw**

biodegradowalnych” (akronim: BIODASK) [załącznik 4, poz. **P2**], gdzie byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie procesu kompostowania mieszanin polimerowych opartych na polikwasie mlekowym oraz zaopiniowaniu (na podstawie wyników badań kompostowania i wcześniejszych doświadczeń) dalszych kroków modyfikacji celem optymalizacji procesu kompostowania.

Od roku 2017 brałem udział w kolejnych projektach badawczo rozwojowych, na **stanowisku kierowniczym**. Jako kierownik zadań na Politechnice Wrocławskiej wykonywałem obowiązki związane z utrzymywaniem dyscypliny finansowej, w zakresie nadzoru terminowości wynikającej z przyjętego harmonogramu działań projektowych (prace merytoryczne, zamówienia) oraz związane z pracami merytorycznymi. Odpowiedzialny byłem także za przygotowanie raportów merytorycznych oraz zatwierdzanie sprawozdań finansowych.

Pierwszym z nich był: „**Conversion of phytogenic silica reach food industry by-products into value-added products**” (akronim: Convert-Si) [załącznik 4, poz. **P4**] realizowany w latach 2017 – 2018 w ramach inicjatywy **ERA-NET (IB)**. Liderem konsorcjum był prof. dr hab. Florin Oancea z Narodowego Instytutu Badań i Rozwoju Chemii i Petrochemii (Bukareszt, Rumunia). Projekt poświęcony był opracowaniu technologii wykorzystania produktów odpadowych z przemysłu spożywczego (celuloza) w pełnowartościowe produkty przemysłu polimerowego. W zakresie zadań przypadających dla Politechniki Wrocławskiej leżało wykonanie włókien technika elektroprzędzenia z roztworów celulozy przygotowanych przez Lidera Projektu, wykonanie wzmacnianych kompozytów celulozowych oraz ich charakterystyka fizykomechaniczna. Mój merytoryczny wkład w projekt polegał na wykonaniu włókien celulozowych z szeregu roztworów oraz zawiesin tego surowca dostarczonego przez Lidera projektu oraz charakterystyka wytrzymałościowa kompozytów wzmacnianych wykonanych klasycznymi technikami przetwórstwa materiałów termoplastycznych (wytłaczanie, mieszanie w stopie).

Przystąpienie do projektu jak i prace w nim stały się naturalną konsekwencją wcześniej podjętych przeze mnie szeregowi czynności zmierzających do rozszerzenia parku maszynowego o urządzenie do elektroprzędzenia jak i w zakresie kompetencji własnych. W 2014r zostałem beneficjentem dotacji celowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej: „**Aktywność powierzchniowa modyfikowanych materiałów polimerowych**” (B40 – 051) w ramach której uzyskałem możliwość dofinansowania zakupu urządzenia do elektroprzędzenia i badań zależności zmian powierzchni (swobodnej energii powierzchniowej) materiałów polimerowych (w tym modyfikowanych) techniką elektroprzędzenia. Zakup został zrealizowany w 2015 roku, w którym to wzięłem po raz trzeci udział w **stażu realizowanym w jednostce zagranicznej** – Instytucie Technologii Żywności i Agrochemii, Wydział Badań Naukowych (IATA CSIC) w Walencji (Hiszpania) [załącznik 4, poz. **S1**]. W trakcie miesięcznego pobytu miałem okazję nabyć doświadczenia w zakresie elektroprzędzenia pracując w zespole prof. Jose Maria Lagaron Ciabello, uznanego autorytetu w zakresie technik elektrohydrodynamicznych. W zakresie merytorycznym, mój pobyt polegał na wytworzeniu struktur elektroprzędzonych dla polikwasu mlekowego stosując zmienne warunki procesowe (stężenie - lepkość, napięcie powierzchniowe, jak i grubość igły i odległość do kolektora) jak i różne konfiguracje urządzeń. Staż ten (realizowany w ramach misji COST, akcji MP1206) pozwolił mi na przyswojenie sposobu pracy jak i interpretacji wyników od praktyków. Co istotne, wizyta w zespole prof. J. M. Lagarona umożliwiła mi także bezpośrednie rozmowy z konstruktorami urządzeń jak i zmianę ich konfiguracji (prof. Lagaron jest założycielem firmy Bioinicia), co pozwoliło na szybsze zrozumienie praktycznej strony ich działania i identyfikacji możliwych problemów podczas prowadzenia procesu.

Kolejny projekt w których brałem udział jako kierownik na Politechnice Wrocławskiej, to prowadzony w latach 2018 – 2021 „**Biocomposite Packaging for Active Preservation of Food**” (akronim: BIOFOODPACK) w ramach inicjatywy **M-ERA-NET2** [załącznik 4, poz. **P3**]. Liderem przedsięwzięcia był prof. Paula Ferreira z Univeristy of Aveiro, Aviero Insittute for Material Cehmistry (CICECO) Portugalia. Celem projektu było wytworzenie materiału termoplastycznego o zadanych właściwościach elektrycznych (niska rezystancja), mechanicznych (elastyczność/wytrzymałość jak dla typowego materiału opakowaniowego do produktów spożywczych – np.: folii LDPE), o niskiej mobilności modyfikatora (brak penetracji do ustroju żywego) i relatywnie o korzystnym rachunku ekonomicznym. Po stronie Politechniki Wrocławskiej, zostały zdefiniowane zadania dotyczące: wyboru napelnacza pod kątem modyfikacji parametrów elektrycznych (próg perkolacji), przy jednoczesnym zapewnieniu parametrów wytrzymałościowych na satysfakcjonującym poziomie dla aplikacji opakowaniowej. W ramach realizowanych zadań merytorycznych uczestniczyłem w czynnościach zmierzających do wykonania szereg kompozycji(kompozyty i mieszaniny polimerowe) oparte na polikwasie mlekowym z wykorzystaniem napelnaczy takich jak m.in.: algi (komercyjnie dostępne oraz dostarczone przez Lidera), tlenki metali, napelniacze elektroprzewodzące (jak: sadza, metale o różnym stopniu frakcji granulometrycznej). Praca doświadczalna pozwoliła na opracowanie składu kompozycji polimerowej o zadanych właściwościach (w szczególności elektrycznych) i przekazanie jej wraz z próbną partią materiału do dalszych badań związanych z migracją składowych kompozycji jak i przydatności do sterylizacji przechowywanego w materiale produktu żywnościowego. Efektem tych działań było upublicznienie wyników w postaci publikacji naukowej opisanej w załączniku 4 w poz. **A4**, oraz prezentacja na konferencji międzynarodowej jako **główny prelegent** [załącznik 4, poz. **K12**].

W trakcie tworzenia niniejszego Autoreferatu pełnię funkcję kierownika w projekcie realizowanym w ramach inicjatywy **Horizont Europa: „Validation of Lunar Water Extraction and Purification Technologies for InSitu Propellant and Consumables Production”** (akronim: LUWEX), w konsorcjum międzynarodowym którego liderem jest dr inż. Paul Zabel z Deutsches Zentrum fuer Luft und Raumfahrt (Brema, Niemcy) [załącznik 4, poz. **P1**]. Celem głównym projektu jest zaprojektowanie oraz wykonanie systemu do pozyskiwania, oczyszczania oraz monitorowania jakości wody przeznaczonej do spożycia oraz do elektrolizy w misjach pozaziemskich z regolitu. W tym celu, w warunkach ziemskich, prowadzony jest proces odmrażania, a następnie kaskadowego oczyszczania (węgiel aktywny, mikro-/ultrafiltracja, procesy membranowe) jak i monitorowania on-line jakości wody w wybranych punktach instalacji. W ramach zadeklarowanych zadań merytorycznych, mojemu nadzorowi podlega proces zaprojektowania i wykonania części systemu odpowiadającego za monitoring jakości wody (topografia układu, dobór sond do pomiaru on-line, interfejsów, szyny zasilania i transmisji danych), integracja wytworzonego modułu z pozostałymi komponentami systemu, określenia ilości i rodzaju badań doraźnych (off-line) dla próbek analitu dostarczonego przez partnerów z TALES ALENA (Turyn, Włochy) oraz DLR (Niemcy) jak i przeprowadzenia procesu współmierności przeprowadzonych pomiarów. Wytworzony system pozyskiwania, oczyszczania i przechowywania wody po zwalidowaniu jego działania w końcowym etapie projektu ma stanowić podstawę do konstrukcji tożsamego układu pracującego w warunkach misji pozaziemskich. Mimo że w zakresie merytorycznym projekt odbiega od dotychczas prowadzonych przeze mnie, to wpisuje się w bliską mi tendencję realizacji **badania o charakterze aplikacyjnym**. Dodatkowo, ze względu na pełnienie przeze mnie od września 2020r. funkcji **Prodziekana ds. badań naukowych i współpracy zagranicznej**, wpisuje się w

zasady polityki rozwoju Wydziału wykorzystując posiadane kompetencje pracowników i zasoby sprzętowe z zakresu badania jakości wody.

5.2.2 Współpraca realizowana z instytucjami zagranicznymi

Prowadząc działania naukowe nawiązywałem kontakty z jednostkami zagranicznymi, co pozwoliło na uzupełnienie moich badań i skutkowało wydaniem publikacji z zespołami zagranicznymi jak i stażami naukowymi czy projektami. W tabeli nr 2 przedstawiam w sposób syntetyczny rodzaj dotychczas podjętej współpracy z zagranicznymi jednostkami naukowymi oraz jej mierzalne efekty (odniesienie do pozycji wskazanych w załączniku 4 do wniosku).

Tabela 2. Współpraca z jednostkami zagranicznymi.

L.p.	Nazwa jednostki	Osoby bezpośrednio współpracujące	Efekt (nr pozycji w zał. 4)
1	Instytut Chemii Makromolekularnej "Petru Poni" Iasi, Iasi, Rumunia https://icmpp.ro/	dr Raluca Nicoleta Darie-Nita dr Juliana Spiridon	A6, A7, K7
2	Centrum Badań nad Ceramikami i Materiałami Kompozytowymi, Uniwersytet w Aveiro, Portugalia https://www.ciceco.ua.pt/?language=eng	dr Claudia Nunes dr Paula Ferreira	A4, K12, P3
3	Instytut Agrochemii i Technologii Żywności, Hiszpańska Krajowa Rada ds. Badań Naukowych (IATA – CSIC), Wydział Ochrony i Jakości Żywności, Walencja, Hiszpania https://www.iata.csic.es/en	dr Jose Maria (Chema) Lagaron Cabello	K3, K4, S1
4	Niemieckie Centrum Lotnictwa i Kosmonautyki (DLR) https://www.dlr.de/en	dr inż. Paul Zabel	P1
5	Narodowy Instytut Badań i Rozwoju Chemii i Petrochemii (ICECHIM) https://icechim.ro/en	prof. dr hab. Florin Oancea	P4
6	Instytut Mechaniki, Otwarte Laboratorium Mechaniki Eksperymentalnej, Bułgarska Akademia Nauk, Sofia, Bułgaria; https://www.imbm.bas.bg/index.php/olem	prof. Rumiana Kotsilkova prof. Evgeni Ivanov	S2
7	Instytut Fizyki i Matematyki, Wydział Fizyki Makromolekuł, Uniwersytet Karola, Praga, Czechy; https://www.mff.cuni.cz/en/kmf	Prof. Hynek Biederman dr hab. Ondrej Kylian	A1, S3

5.2.3 Współpraca z podmiotami gospodarczymi

Po uzyskaniu stopnia doktora, poszukiwałem także bardziej bezpośrednich dróg wykorzystania wyników badań naukowych co przejawia się w prowadzonej współpracy z podmiotami gospodarczymi. W tym celu w latach 2013 i 2014 odbyłem dwa staże przemysłowe w jednostkach zajmujących się przetwórstwem materiałów polimerowych:

- 1) w 2013 trzymiesięczny staż na wydziale MACOPLAST (przetwórstwo PVC) w MACOPRODUCTION Polska Sp. zo.o. (o/Wrocław) [załącznik 4, poz. **W1**]
- 2) w 2014 pięciomiesięczny staż w ERGIS-EUROFILMS o/Oława (linia produkcji folii PP oraz bednarki PET) [załącznik 4, poz. **W2**]

Staż te realizowane były w ramach **Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki** i umożliwiły mi bezpośredni kontakt z reżimem produkcyjnym i podniesienie kompetencji w zakresie organizacji produkcji (formalnej) jak i od strony typowo przetwórczej, gdzie ze względu na skalę procesu musiałem zmierzyć się z innymi rodzajami wystąpień. W szczególności zapoznałem się od strony praktycznej (właściwej dla każdego z dwóch Przedsiębiorstw) ze stosowaniem Kodeksu Dobrych Praktyk czy zasadami racjonalizatorskimi jak Lean Management, 6 sigma, Kaizen. W zakresie obowiązków merytorycznych (oprócz zapoznania się z procesem i uczestnictwa w jego biegu) należało:

- 1) opracowanie ciekłej mieszaniny do oczyszczania dyszy wytłaczarskiej bez ingerencji środków mechanicznych;
- 2) identyfikacja materiałowa, analiza przyczyn powstania i zaproponowanie metod ograniczania nadbudowań na linii wytłaczania;
- 3) analiza zmian składu surowca, właściwości wytrzymałościowych wykonanych produktów i zaproponowanie możliwych rozwiązań pod kątem ograniczenia bądź eliminacji niespełnienia wymogów jakościowych wyrobu;

Dzięki temu postępowaniu od roku 2015 do dnia sporządzenia niniejszego autoreferatu, znacznej intensyfikacji uległa liczba realizowanych zleceń, ekspertyz i innych aktywności prowadzonych we współpracy z podmiotami gospodarczymi, czego mierzalny efekt został opisany załączniku 4, poz. **W1 – W18** (z trzech do dziesięciu)³ do 10) oraz **E1 – E11** (z dwóch do dziewięciu). Wśród tych osiągnięć, na szczególną uwagę zasługuje współpraca z MB Recykling sp. zo.o. Przedsiębiorstwo Obrotu Odpadami sp. k. w zakresie wykonania ekspertyzy dotyczącej możliwości odzyskania surowca z nowo pozyskanego strumienia odpadów, wdrożenia linii do recyklingu tworzyw sztucznych (przy wsparciu finansowe BGK) i wytwarzania produktu z pozyskanych surowców [załącznik 4, poz. **E5**]. Ekspertyza ta dotyczyła oceny **strony ekonomicznej przedsięwzięcia** (opłacalność na etapie pozyskiwania strumienia zmieszanego, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych związanych z działalnością, jak i zysk finansowy przedsięwzięcia po wytworzeniu konkretnego produktu), jak i opisu strony **technologicznej** zawierającego m.in.: sposób odzysku i oczyszczania strumieni interesujących materiałów z dostarczonej frakcji, rodzaj procesów przetwórczych, składowe linii produkcyjnej (wraz z podaniem przykładowych elementów – nazwa, producent, wydajność, wymagania energetyczne), opis procesu (z wąskimi gardłami, operacjami jednostkowymi). Ekspertyza została sporządzona na podstawie danych finansowo – operacyjnych Przedsiębiorstwa, jak i wyników badań B+R wykonanych przez Przedsiębiorcę.

Kontynuacją współpracy z Podmiotem na tym polu było działanie przeprowadzone w 2021r. dotyczące **wsparcia w zakresie składania wniosku finansowego na rozwój działalności B+R** [załącznik 4, poz. **E2**]. Wsparcie obejmowało analizę dokumentacji aplikacyjnej pod kątem wskazania uzupełnień jak i jej usystematyzowanie.

Kolejnym wartym podkreślenia działaniem jest przeprowadzone w 2017 rozeznanie rynku tworzyw polimerowych ze wskazaniem **obszarów innowacyjności**, przeprowadzona dla spółki DANAE sp. zo.o. [załącznik 4, poz. **E6**], czy wykonanie ekspertyzy na szkolnych obiektach sportowo-rekreacyjnych (wizja lokalna) w związku z powstaniem brunatnych wykwitów [załącznik 4, poz. **E7**].

Moja współpraca z sektorem gospodarczym ma charakter ciągły, zmienia się natomiast rodzaj aktywności: od standardowych zleceń oceniających właściwości fizykomechaniczne surowca/produktu, poprzez analizę przyczyn i podanie środków zaradczych celem redukcji dysfunkcji materiału/eliminacji niekorzystnego zjawiska, po kompleksowe oceny i analizy jak wymieniono w załączniku 4 poz. **E5** i **E7**. Często podejmowanym przeze mnie wyzwaniem są także prace badawczo – rozwojowe z zakresu materiałoznastwa jak **opracowywanie składu mieszaniny/kompozytu** dla spełnienia określonych wymagań podmiotu zlecającego, jak np.: współpraca z VELUX Polska przy opracowaniu składu kompozytu napełnianego odpadami z produkcji ram okiennych [załącznik 4 poz.**E4**], czy **technologii odzysku surowca z odpadowego styropianu budowlanego** [załącznik 4, poz. **P5**]. To ostatnie działalnie, ze względu na formę, rozmiar finansowania jak i czas jego realizacji (12 miesięcy) zostało zakwalifikowane w załączniku 4 jako projekt, którego przedmiotem było opracowanie technologii chemicznego odzysku surowca z wykorzystaniem rozpuszczalników o niskim negatywnym oddziaływaniu na środowisko naturalne (substancje występujące naturalnie w środowisku). W ramach projektu prowadzonego dla EKO-LOGIS sp. zo.o., finansowanym z mechanizmu **Dużego Bonu na Innowacje** (Program Operacyjny Innowacyjny Rozwój), **stworzono od podstaw laboratoryjną linię do chemicznego przetwarzania materiału oraz jego odzysku do postaci zdatnej do przetwórstwa mechanicznego**. W zleceniu tym występowałem jako jego koordynator a zadania realizowałem wraz z dr inż. Stanisławem Frąckowiakiem.

5.2.4 Doradztwo

Swoje kompetencje w zakresie właściwości, przetwórstwa i innowacyjnego charakteru rynku tworzyw polimerowych realizuję w wielu ciałach doradczych jako:

- a) **zastępca członka Komitetu Sterującego** akcji FA 0904 (Food and Agriculture, “Eco-sustainable food packaging based on polymer nanomaterials”) sieci European Cooperation in Science and Technology (COST), w latach 2010 – 2014 [załącznik 4, poz. **II. 14**];
- b) ekspert oceniający **wnioski projektów B+R** przy Narodowym Centrum Badań i Rozwoju [załącznik 4, poz. **F1 – F3, F5, F6**], Łotewskiej Akademii Nauk [załącznik 4, poz. **F4**], od roku 2018;
- c) **członek Grupy Doradczej ds. Programów Inwestycyjnych UE – Partnerstwa Process4Planet** (powołanego na podstawie porozumienia zawartego pomiędzy Komisją Europejską a Stowarzyszeniem A.SPIRE) działającego w Klastrze IV („Technologie cyfrowe, przemysł, przestrzeń kosmiczna”) Filaru II (Globalne wyzwania i europejska konkurencyjność przemysłowa”) Horyzontu Europa [załącznik 4, poz. **ZE1**] – od 2019r.;
- d) **członek Rady Nadzorującej Akademickiego Inkubatora Przedsiębiorczości Politechniki Wrocławskiej** [załącznik 4, poz. **ZE2**] – od 2020r.;
- e) recenzent publikacji naukowych czasopism MDPI i Elsevier [załącznik 4, poz. **Re1 – Re4**] – od 2020r.

- f) **Członek Grupy Roboczej** „Zero Waste PWR” Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Ochrony Klimatu działającego na Politechnice Wrocławskiej [załącznik 4, poz. **ZE3**] – od 2020r.;
- g) Przedstawiciel Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej w **Radzie Centrum Gospodarki Odpadowej i Recyklingu – Krajowy Klaster Kluczowy** [załącznik 4, poz. **ZE4**] – od 2020r.;
- h) **z-ca kierownika Grupy Roboczej** „Bezpieczeństwo Środowiska naturalnego” Makroklaster Bezpieczeństwa Publicznego [załącznik 4, poz. **ZE5**]– od 2022r.;

5.3. Dalsze badania

Poruszone wątki badawcze które znalazły odzwierciedlenie w opublikowanych pracach i aktywnościach wymienionych w załączniku 4 stanowią bazę do dalszych prac. Oprócz kontynuacji działalności związanej z pełnionymi funkcjami (na Wydziale Inżynierii Środowiska i poza nim) prowadząc prace badawcze, chciałbym skupić się na poniższych aspektach:

- 1) wytwarzania materiałów z surowców odnawialnych o znacznym stosunku powierzchni właściwej do objętości, także modyfikowanych powierzchniowo w zakresie oddziaływań chemicznych;
- 2) wykorzystania procesów metabolicznych do zamykania obiegu materiałowego w izolowanych ekosystemach;

W zakresie tematu 1) zostały przeprowadzone wstępne badania dotyczące wpływu warunków procesu elektroprzędzenia na finalną strukturę mikro i makroskopową wytworzonych struktur ażurowych. Wyniki zostały upublicznione poprzez aktywności wymienione w załączniku 4 w pozycjach **B6, B7, B8, B11, K9, K10, K11**. Rozwijanie tematu materiałów ażurowych chcę prowadzić w zespole badawczym wraz z dwójką (obecnych) doktorantów, których jestem promotorem pomocniczym: mgr inż. Karoliną Sobczyk oraz mgr. inż. Maciejem Borowczakiem. Obecnie zostali uwzględnieni w złożonej aplikacji konkursowej inicjatywy LIDER.

W zakresie tematu 2, podwaliny stanowią wyniki opublikowane i opisane w załączniku 4 w pozycjach **B1, B2, B4, K8** a także prowadzony przeze mnie projekt o akronimie LUWEX [załącznik 4, poz. **P1**]. Rozwojowi tematu sprzyja nie tylko zorientowanie programów finansujących badania na tematykę cyrkularności (tworzyw), ale także zawarcie w lipcu 2023r. przez Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej Umów o Współpracy z podmiotem zajmującym się wykorzystaniem organizmów do metabolizowania produktów związanych z działalnością człowieka, także w misjach pozaziemskich.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

- Wywiad w telewizji TVN24 (21 grudnia 2020r.), o tworzywach ze źródeł odnawialnych: <https://tvn24.pl/go/programy,7/tylko-w-tvn24go-odcinki,283316/odcinek-872,S00E872,423586>
- Podcast w Akademickim Radiu LUZ (31 marca 2021r.) – „Tworzywa w służbie człowiekowi”: <https://www.mixcloud.com/na-synapsach/skieruj-ster-na-bsr-1-tworzywa-w-s%C5%82u%C5%BCbie-cz%C5%82owiekowi/>

- Członek Komitetu Naukowego IV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Problem Odpadów i ich Zagospodarowania, Tygiel 2022 [załącznik 4, poz. **Ko2**];
- Dolnośląski Festiwal Nauki – prezentacje dla szkół w laboratorium przetwórstwa tworzyw polimerowych, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej (lata 2019 – 2022);
- Dzień Młodego Naukowca (wydarzenie towarzyszące Środkowoeuropejskiemu Forum Technologicznemu CETEF, 24 września 2022r.) – dyskusja panelowa: „Rola młodych naukowców w rozwoju współpracy międzynarodowej” [załącznik 4, poz. **K13**];
- Członek Komitetu Naukowego Konferencji Naukowa Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii i Ochronie Środowiska, EKODOK (edycja X i XV) [załącznik 4, poz. **Ko1, Ko3**];
- Podcast Politechniki Wrocławskiej i Ekosystem Wrocław sp. z o.o. (30 maja 2023r.) – „EKO znaczy dobrze: Tworzywa są piękne choć mikroplastik jest zły”: <https://open.spotify.com/episode/2CMTPyYkgMn1v5RN7Ir4YR?si=df575cd6669a4e55&fbclid=IwAR05ix0YZ1A0ImPr-IduNu7iQ1iaPNsuUjgbB38uDFgr0cLQIZOk-2lYWuo&end=1>
- Dzień Wody na Politechnice Wrocławskiej (22 marca 2023r.) – „Badanie wody w kosmosie”: <https://www.youtube.com/watch?v=B20XHKB8Dmw>

7. Inne informacje ważne z punktu widzenia kandydata dotyczące jego kariery zawodowej

- Założyciel i Prezes spółki odpryskowej BDC Technology Sp. zo.o. – data założenia: listopad 2018 (komercjalizacja wyników prowadzonych badań, wykonanie audytów technologicznych dla podmiotów zewnętrznych)
- Prodziekan ds. badań naukowych i współpracy zagranicznej, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej (kadencja 2020/21 – 2023/24)
- Brązowy Medal za długoletnią służbę nadany postanowieniem Prezydenta RP z 27 października 2022r.
- Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność Uczelni – przyznana w latach: 2016, 2017, 2018, 2020, 2021, 2022

8. Działalność organizacyjna i dydaktyczna

- Studium Przygotowania Pedagogicznego, Uniwersytet Wrocławski (sierpień 2005r.) (przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora);
- Udział w warsztatach przygotowujących do opracowania wniosków do 7.Programu Ramowego EU (lipiec 2012r.);
- Udział w szkoleniu: "Skuteczne zarządzanie i rozliczanie projektów badawczych" (luty 2013r);

- Promotor pomocniczy dwojga doktoratów mgr inż. Karolina Sobczyk, mgr inż. Maciej Borowczak.
Promotor: dr inż. hab. Katarzyna Piekarska, prof. (od października 2018);

.....

(podpis wnioskodawcy)