

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Stanisław Frąckowiak

ORCID: 0000-0002-9231-4140

Scopus: 8546811700

Web of Science: AAE-8215-2019

PBN: 5e7091f9878c28a04738dfba

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Stopień doktora

02.07.2008 – Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska,

doktor nauk technicznych,

Rozprawa doktorska: „Polimerowe materiały sensoryczne z pierwotnych i odpadowych tworzyw sztucznych”.

Promotor: dr hab. inż. Marek Kozłowski

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Pielichowski

dr hab. Andrzej Szczurek

Tytuł magistra inżyniera

11.07.2003 - Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, **kierunek Mechanika i Budowa Maszyn w zakresie inżynierii materiałów konstrukcyjnych.**

Praca magisterska: „Kompozyty elektroprzewodzące”

Promotor: dr hab. inż. Marek Kozłowski

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

01.10.2012 - nadal	adiunkt , Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska
01.03.2011 – 30.09.2012	asystent , Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.

Osiągnięcie naukowe

Mając na uwadze wagę problemu, jak i dotychczas uzyskane rezultaty, za moje najważniejsze osiągnięcie naukowe po uzyskaniu stopnia doktora uważam opracowanie kompleksowej analizy dotyczącej określenia potencjału aplikacyjnego dla względnie nowych materiałów polimerowych pochodzących z surowców odnawialnych (zwanymi dalej „biopolimerami”), jak i których istotną cechą jest biodegradowalność w odpowiednich, kontrolowanych, warunkach. Będąc w pełni świadom faktu o jak szerokiej grupie materiałów mowa, o zróżnicowanych właściwościach, budowie i strukturze, ograniczyłem analizę do wybranych biopolimerów. Za kryterium doboru przyjąłem dostępność na rynku komercyjnym. Zaś uzyskanie odpowiednich, pożądanych, właściwości uzyskałem na drodze wytworzenia materiałów kompozytowych z wybranymi napełniaczami. Poruszane w osiągnięciu zagadnienia naukowe dotyczą głównie:

- powiązania technologii produkcji opracowanych materiałów z ich końcowymi właściwościami funkcjonalnymi
- odniesienie metod modyfikacji składników materiałów kompozytowych do oddziaływań na granicy osnowa/napełniacz
- potencjału opracowanych materiałów do zastąpienia tworzyw ropopochodnych

Powiązany aspekt badawczy moich prac, przyczyniającym się do rozwoju wiedzy w omawianym temacie, jest wykorzystanie metod modyfikacji struktury kompozytu, mających na celu dalszą poprawę wybranych właściwości. Przykładowo

struktur o kontrolowanej porowatości, czy też modyfikowanych za pomocą orientacji na gorąco.

W zawartym poniżej opisie przyjęto następujące skróty

PLA – poli(kwas mlekowy)

PBAT – poliadypinian 1,4-butylenu-co-tereftalan 1,4-butylenu

PBS – poli(bursztynian butylenu)

SEM – skaningowy mikroskop elektronowy

CNT – nanorurki węglowe

TS – tworzywa sztuczne

Kontekst osiągnięcia

W trakcie realizacji doktoratu opracowałem szereg materiałów kompozytowych na osnowie między innymi polimerów pochodzących z recykligu (wtórnych). Wytworzone elementy miały za zadanie wykazywać żądany zestaw właściwości, z których najważniejszą pod względem funkcjonalności była zdolność do zmian oporności elektrycznej w obecności wybranych substancji na drodze selektywnej rozpuszczalności. Część z opracowanych materiałów kompozytowych wykonana była na osnowie polimerów wtórnych, miało to na celu przetestowanie jak polimery o bliżej nieznannej historii obciążeń termomechanicznych, jak i niekreślonym stopniu degradacji mogą się sprawować jako główny składnik tego typu czujników. Docelowo, czy jest możliwość wdrożenia materiałów odpadowych do elementów bardziej ambitnych niż te dotychczas wytwarzane (meble ogrodowe, profile, słupki drogowe, część opakowań itp.), a przez zwiększenie ich aplikacyjności, zmniejszenie ilości odpadów trafiających na składowiska. Wtedy biopolimery były jeszcze materiałami drogimi, o ograniczonej dostępności, tak więc wykorzystanie recyklatów było jedyną opcją. Wyniki okazały się obiecujące, jednak w dalszej swojej karierze naukowej skupiłem się na problemach naukowych powiązanych w większości z drugim podejściem do zmniejszenia ilości po aplikacyjnych tworzyw sztucznych, trafiających do środowiska gdy stają się odpadem. W 2001 roku firma Novamont uruchomiła pierwszą wielkoskalową instalację (Blair, Nebraska, USA) do produkcji jednego z najbardziej obecnie popularnych polimerów biodegradowalnych, PLA. Za nim poszły inne firmy i koncerny. Z uwagi na rosnącą dostępność biopolimerów na rynku tworzyw sztucznych, jak i też wdrażane polityki

przez UE (Zrównoważonego Rozwoju, Gospodarki Cyrkularnej), dalsze swoje działania badawcze skupiłem właśnie na wykorzystaniu tych materiałów.

Zakres badań

Liczba obecnie występujących tworzyw sztucznych (zwanymi potocznie „plastikami”) w otaczającym nas świecie jest bardzo duża. Wynika to z faktu, że na przestrzeni ostatnich kilku dekad z uwagi na właściwości tych materiałów (doskonały stosunek wytrzymałości do masy, niska gęstość, bardzo dobra odporność na czynniki naturalne) rozwój tej gałęzi gospodarki był bardzo znaczący. Zróżnicowanie właściwości poszczególnych polimerów w połączeniu z różnymi dodatkami (uniepalnicze, pigmenty, wszelkiej maści modyfikatory, wypełniacze do materiałów kompozytowych i inne) czynią recykling takich materiałów przedsięwzięciem niełatwym. Stąd też kuszącą alternatywą wydaje się wykorzystanie polimerów o zbliżonych właściwościach, umożliwiających podobne możliwości aplikacyjne, lecz podatnych na proces kompostowania i rozkładających się w rozsądnym przedziale czasowym (tygodnie, miesiące). Mając na uwadze fakt, że obecnie komercyjnie dostępnych jest równie wiele biopolimerów, które podobnie do swoich ropopochodnych odpowiedników mogą być modyfikowane w podobny sposób, ograniczyłem zakres materiałów przedstawionych w osiągnięciu do tych o największym potencjale komercjalizacyjnym. Konkretnie zaś do PLA oraz częściowo, PBAT i PBS. Modyfikację materiałów przeprowadziłem na drodze mieszania w stopie kompozytów polimerowych wraz z różnymi wypełniaczami mającymi na celu uzyskanie materiału o żądanym potencjale aplikacyjnym. Wspomniana aplikacyjność w większości przypadków celowała w materiały przeznaczone do wyrobów opakowaniowych. Było to podyktowane faktem, że to właśnie sektor opakowaniowy stanowi obecnie przytłaczającą większość wyrobów produkowanych z tworzyw sztucznych. Niestety charakteryzują się też znacząco krótszym cyklem życia. W większości przypadków bardzo szybko stają się odpadami.

Na osiągnięcie naukowe składa się monotematyczny cykl 6 publikacji o sumarycznym Impact Factor wynoszącym 19,505 oraz łącznej sumie punktów MNiSW równej 430.

1 Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Karol J. Leluk, Kazimierz Orzechowski, Marek Kozłowski. Foamed poly(lactic acid) composites with carbonaceous fillers for electromagnetic shielding. *Materials & Design*. 2015, vol. 65, s. 749-756.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.009>

2 Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Marek Kozłowski. Multifunctionality of foamed poly(lactid acid) and its composites with nanofillers. *Polymer Composites*. 2015, vol. 36 nr 9, s. 1647-1652.

<https://doi.org/10.1002/pc.23073>

3 Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Karol J. Leluk, Marek Kozłowski. New class of shear oriented, biodegradable packaging material. *Composites Part B, Engineering*. 2016, vol. 92, s. 1-8.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.036>

4 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>

5 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>

6 Stanisław Frąckowiak. Sustainable Approaches to Plastics. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023, vol. 25, pp. 128-140.

<https://doi.org/10.54740/ros.2023.013>

Udział współautorów w publikacjach został przedstawiony w *Zał. 5 Cykl publikacji składający się na osiągnięcie wraz z oświadczeniami współautorów.pdf*. Publikacje 4 oraz 5 zawierają w tekście Author Credit Statement wyszczególniający udział wszystkich autorów w stworzeniu manuskryptów.

Tytuł osiągnięcia (na podstawie monotematycznego cyklu publikacji)

Analiza możliwości implementacji wybranych biopolimerów jako alternatywy dla konwencjonalnych tworzyw sztucznych.

Publikacja 1

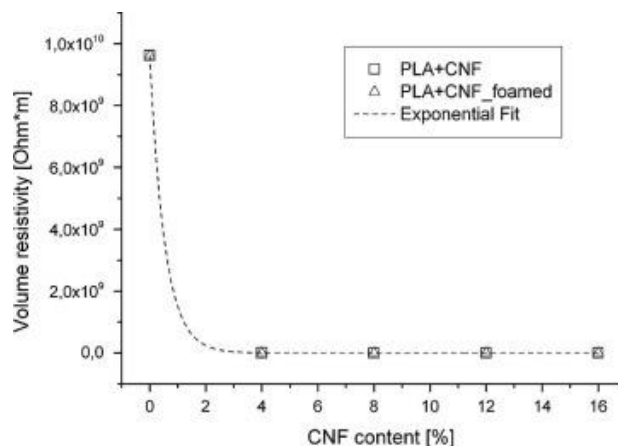
Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Karol J. Leluk, Kazimierz Orzechowski, Marek Kozłowski. Foamed poly(lactic acid) composites with carbonaceous fillers for electromagnetic shielding. *Materials & Design*. 2015, vol. 65, s. 749-756.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.009>

W artykule mój wkład polegał na konsultacji merytorycznej, conceptualizacji, opracowaniu wstępnej wersji artykułu, przeprowadzeniu pomiarów oporności skrośnej, koordynacji pracy pozostałych Autorów.

Celem tej pracy było wykorzystanie biopolimeru, jakim jest PLA, do wytworzenia materiału przeznaczonego do opakowań elementów elektronicznych, wrażliwych na wyładowania elektrostatyczne. Dodatkowym atutem wspomnianych materiałów była zdolność tak wytworzonych opakowań do ekranowania promieniowania elektromagnetycznego. Głównym aspektem badawczym pracy był dobór składu, jak i parametrów wytwórczych pozwalający na otrzymanie lekkiego, biodegradowalnego materiału kompozytowego otrzymanego z zastosowaniem możliwie tanich napełniaczy elektroprzewodzących, jednocześnie nie ograniczając pola zastosowań dzięki odpowiednim dla tych aplikacji właściwościom wytrzymałościowym. W tym badaniu rozwinąłem dotychczas posiadaną wiedzę z zakresu wytwarzania kompozytów elektroprzewodzących na osnowie tworzyw sztucznych o implementację w ich miejsce polimerów biodegradowalnych. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych eksperymentów dały też impuls do dalszych badań z udziałem napełniaczy o zróżnicowanej geometrii, jak i skali (np. nanorurki węglowe, nanowłókna węglowe). Ostatecznie, rezultaty badań pozwoliły na ocenę wpływu parametrów przetwórczych, struktury otrzymanych materiałów, jak i składu kompozytu na właściwości materiałów opakowaniowych przeznaczonych do produktów wrażliwych na promieniowanie

elektromagnetyczne oraz wyładowania elektrostatyczne. Zastosowane nanorozmiarowe napełniacze o rozwiniętej strukturze pozwoliły na otrzymanie materiałów kompozytowych o obniżonej oporności elektrycznej, z progiem perkolacji poniżej 2% objętościowych (Rys. 1)



Rys. 1. Zależność oporności elektrycznej od zawartości nanowłókien węglowych w biokompozytach na osnowie PLA.

Przedstawiona i opisana w artykule zależność pomiędzy porowatością otrzymanych struktur, a ich wybranymi właściwościami użytkowymi, dały mi podstawy do kontynuowania prac w kierunku lekkich kompozytów biopolimerowych.

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Implementacja biopolimeru jako skutecznego zamiennika tworzyw ropopochodnych do materiałów opakowaniowych mających zastosowanie w elektronice;
- Wskazanie technologii spieniania jako procesu umożliwiającego otrzymanie lekkich opakowań o pożądanych właściwościach użytkowych;
- Wskazanie nanomateriałów jako skutecznego surowca do produkcji tego typu materiałów opakowaniowych.

Publikacja 2

Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Marek Kozłowski. Multifunctionality of foamed poly(lactid acid) and its composites with nanofillers. *Polymer Composites*.

2015, vol. 36 nr 9, s. 1647-1652.

<https://doi.org/10.1002/pc.23073>

W artykule mój wkład polegał na konsultacji merytorycznej, koordynacji działań pozostałych Autorów, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu, przeprowadzeniu testów zależności oporności elektrycznej od temperatury i ich interpretacji.

Aspektem badawczym pracy była ocena możliwości dalszej modyfikacji właściwości kompozytów na osnowie biopolimeru (PLA) poprzez implementację wybranych napełniaczy.

W tym celu wykorzystano opracowane wcześniej techniki mieszania w stopie oraz spieniania do otrzymania materiałów kompozytowych o zróżnicowanych właściwościach. Oprócz dotychczas wykorzystywanych napełniaczy węglowych uwzględniono też kolejny nanonapełniacz o znacząco różnej geometrii, jakim był modyfikowany organicznie montmorylonit. Minerale, jeden z pierwszych komercyjnie wykorzystanych do otrzymania nanokompozytów polimerowych. Opracowano kolejne biokompozyty o polepszonej barierowości na tlen i parę wodną, obniżonej gęstości oraz potencjale do zastosowań jako czujniki temperatury (stabilna zmiana oporności skrośnej w funkcji temperatury). Tego typu funkcjonalność biokompozytów była przedmiotem moich badań już wcześniej, wyniki podobnych badań (biokompozytowe czujniki do wybranych substancji, naprężenia) opublikowałem w artykułach nie będących częścią omawianego dzieła [zał. 4, poz. C.12, C.11, C.9]. Przeprowadzone badania nad zwiększeniem barierowości pozwoliły mi określić metodologię konieczną do wytworzenia biokompozytów przeznaczonych do opakowań do żywności.

W późniejszym czasie okazało się to bardzo przydatne w trakcie realizacji projektu BIOFOODPACK [zał. 4, poz. D.2].

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Wskazanie nanonapełniaczy mineralnych jako materiału do wytwarzania biokompozytów o podwyższonej barierowości dla tlenu;
- Wskazanie wzajemnej relacji pomiędzy wpływem temperatury a naprężenia dla biokompozytów opracowanych jako czujniki;
- Dalsze dopracowanie technologii otrzymywania struktur lekkich (porowatych) dla badanych materiałów biokompozytowych.

Publikacja 3

Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Karol J. Leluk, Marek Kozłowski. New class of shear oriented, biodegradable packaging material. *Composites Part B, Engineering*. 2016, vol. 92, s. 1-8.

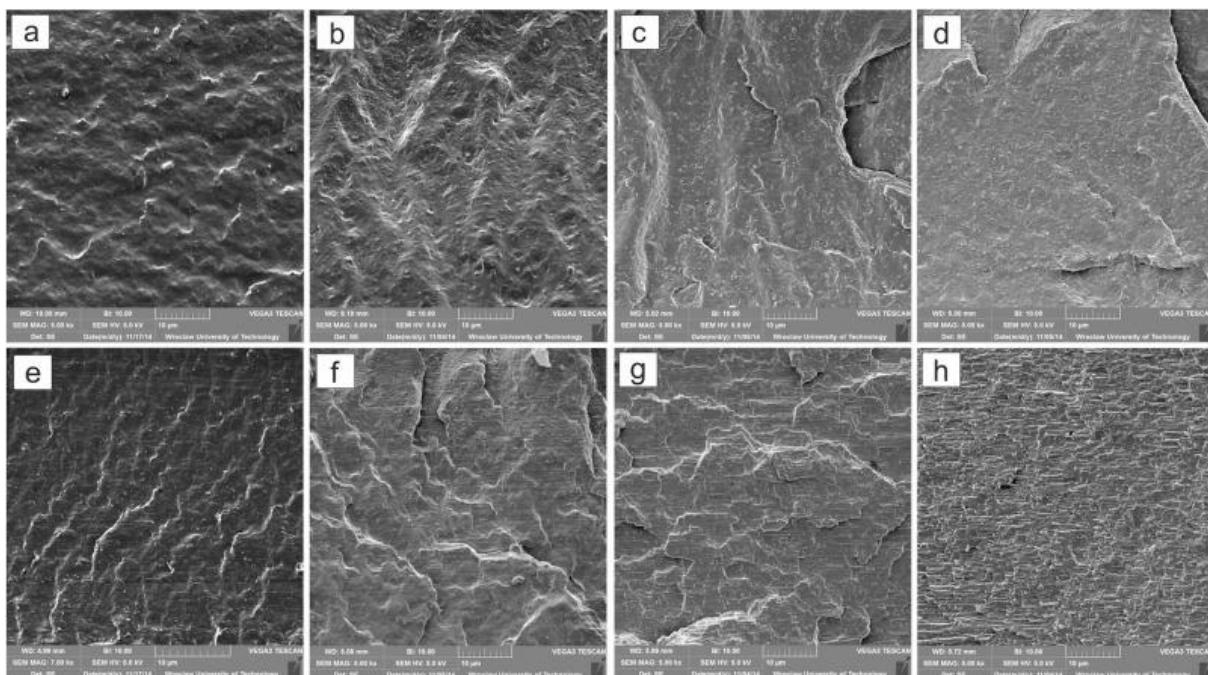
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.036>

W artykule mój wkład polegał na konsultacji merytorycznej, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu, przeprowadzeniu i interpretacji badań reologicznych, koordynacji prac pozostałych Autorów.

Aspektem pracy była ocena możliwości implementacji do osnowy biokompozytu mieszaniny dwóch biopolimerów.

Mając na uwadze fakt, iż większość polimerów ropopochodnych jest materiałami niemieszalnymi, co jest jednym z podstawowych problemów w procesie ich recyklingu, tak i biopolimery wykazują podobną niemieszalność względem siebie. Jednakże mimo tego, jest wiele popularnych mieszanin polimerowych dostępnych na rynku, gdzie pomimo braku mieszalności, częściowa synergia obu różnych polimerów w znacznym stopniu to rekompensuje. Tak więc rozwinięciem aspektu badawczego poruszanego w pracy było określenie, czy w przypadku biopolimerów jest możliwa podobna aplikacja. Zaproponowana przeze mnie metoda polegała na wytworzeniu serii mieszanin o zróżnicowanych udziałach PLA do PBS z późniejszym wprowadzeniem do układu wielościennych nanorurek węglowych. Dodatkowym czynnikiem, mającym wpływ na właściwości opracowywanych materiałów, była orientacja wytworzonych wstęp biokompozytowych w celu uzyskania anizotropii, proces często stosowany przy produkcji folii opakowaniowych z „konwencjonalnych” tworzyw sztucznych. Zaproponowana procedura okazała się skuteczna, co potwierdziły wyniki badań wytrzymałościowych oraz termicznych (Skaningowa Kalorymetria Różnicowa). Na szczególną uwagę zasługują wyniki otrzymane z pomiarów reologicznych, gdzie określono zależność między właściwościami reologicznymi kompozytów (punkt równowagi modułów zachowawczego i stratności) a progiem perkolacji dla wykorzystanego tutaj napełniacza. Próg perkolacji (krytyczne stężenie napełniacza w osnowie polimeru, powyżej którego formuje ciągłe ścieżki) w przypadku napełniaczy elektroprzewodzących jest szczególnie istotny, jako że określa, kiedy kompozyt z izolatora staje się półprzewodnikiem. W efekcie zastosowanych działań uzyskano biokompozyt o optymalnym udziale obu biopolimerów, obniżonej oporności

elektrycznej, polepszonych właściwościach wytrzymałościowych oraz anizotropii na wybranym kierunku orientacji (Rys. 2).



Rys. 2. Zdjęcia z SEM folii biokompozytów PBS/PLA zawierających a) 0.5% CNT, b) 1.0% CNT, c) 3.0% CNT, d) 5% CNT prostopadłe do kierunku orientacji oraz e) 0.5% CNT, f) 1.0% CNT, g) 3.0% CNT, h) 5% CNT równoległe do kierunku orientacji

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Opracowanie mieszaniny biopolimerów o polepszonych właściwościach względem polimerów składowych;
- Skuteczna modyfikacja właściwości otrzymanych biokompozytów za pomocą procesu orientacji na gorąco;
- Opracowanie biokompozytu, gdzie w wyniku połączenia procesu orientacji oraz wprowadzonego napelnacza uległy poprawie właściwości w obniżonych temperaturach ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Publikacja 4

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>

W artykule mój wkład polegał na konceptualizacji, przeprowadzeniu części pomiarów i ocenie otrzymanych wyników, ocenie poprawności edytorskiej pracy.

Aspektem badawczym pracy było opracowanie metody wytwarzania biodegradowalnego biokompozytu na osnowie mieszanin PLA oraz PBAT, zawierającego napełniacz mineralny jakim był montmorylonit. Praca ta jest kontynuacją zagadnień badawczych, jakie były opracowane w poprzednich z przedstawionych tutaj publikacjach. Dotychczas uzyskane wyniki modyfikacji właściwości kompozycji biopolimerowych były impulsem do wprowadzenia kolejnego biopolimeru, jakim jest PBAT. Zarówno cel, jak i większość metod badawczych, pozostały bez zmian, tzn. opracowanie metod wytwarzania biokompozytów do zastosowań w przemyśle opakowaniowym na drodze mieszania w stopie, stanowiących alternatywę dla obecnie stosowanych polimerów ropopochodnych. Na uwagę zasługuje też wartość dodana w postaci wprowadzenia tzw. „chain extender”, związku mającego istotny wpływ na ciężar cząsteczkowy danego polimeru, a co za tym idzie pozostałe jego właściwości. Zastosowane metody badawcze uwzględniały większość właściwości istotnych z punktu widzenia przewidywanych zastosowań, tj. przepuszczalność tlenu, właściwości wytrzymałościowe, przetwórcze, termiczne. Dalszym rozwinięciem aplikacyjności w kierunku opakowań było określenie energii powierzchni (zwilżalności) otrzymanych biokompozytów. Jest to szczególnie istotne w tym przypadku, z uwagi na to, że determinuje możliwość nanoszenia nadruków na etykiety wykonane z badanych materiałów. W rezultacie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż wprowadzenie z natury elastycznego PBAT do bardziej kruchego PLA pozwala na zwiększenie wydłużenia otrzymanej mieszaniny. Z drugiej zaś strony, mogąc zmieniać ciężar cząsteczkowy PLA, możliwa jest dodatkowa zmiana właściwości wytrzymałościowych tego biopolimeru. Mając na uwadze otrzymane wyniki, jest możliwość zaprojektowania właściwości materiału pod konkretne zastosowania. Pozytywny wpływ wprowadzonego procesu orientacji, jak i dodatku montmorylonitu pozostał bez zmian na właściwości funkcjonalne celowane pod przemysł opakowaniowy.

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Wskazano możliwość implementacji mieszaniny biopolimerowej PLA/PBAT jako osnowy dla kompozytów do zastosowań w przemyśle opakowaniowym;
- Określono próg częściowej mieszalności dla obu materiałów;

- Scharakteryzowano wpływ związków wydłużających łańcuchy polimerowe na właściwości badanych biopolimerów.

Publikacja 5

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>

W artykule mój wkład polegał na konceptualizacji, udziału w przygotowywaniu przeglądu literaturowego, przygotowaniu wstępnej wersji manuskryptu, przeprowadzeniu części pomiarów i ocenie uzyskanych wyników.

Celem pracy było określenie wpływu zróżnicowanych dodatków na właściwości biokompozytu na osnowie PLA. Kontynuacją prac nad analizą możliwości zastąpienia konwencjonalnych polimerów biokompozytami było rozwinięcie badanych materiałów o napełniacze w formie włókien. Analiza właściwości podobnych kompozytów (jako np. wibroizolatory) została przeze mnie opublikowana w artykułach nie będących częścią tego dzieła [zal. 4, poz. C.2, C.5]. Dodatkowym aspektem badawczym ujętym w pracy było wykorzystanie napełniacza włóknistego w postaci włókien celulozowych w celu kompleksowej analizy zależności geometrii stosowanych napełniaczy na właściwości końcowe opracowywanych biokompozytów.

W pracy zweryfikowano wpływ napełniaczy mineralnych o różnej geometrii (stosunek długości do grubości) i skali (nano, mikro): włókna celulozowe (najsmuklejsze), strącany węglan wapnia (heksagonalne) oraz organicznie modyfikowany montmorylonit (nanorozmiarowe płytki). Biokompozyty zostały wytworzone w oparciu o wcześniej uzyskane parametry przetwórcze na drodze mieszania w stopie. Otrzymane wyniki potwierdziły pozytywny wpływ wybranych dodatków na właściwości biokompozytów, mogących znaleźć zastosowanie w sektorze opakowaniowym. Zgodnie z przewidywaniami zostało dowiedzione, że kształt zastosowanego napełniacza jest jednym z kluczowych czynników decydujących o właściwościach końcowych danego biokompozytu. Potwierdzono też korelację pomiędzy właściwościami kompozytu włóknistego, a średnią długością włókien oraz ich orientacją, stopniem dyspersji, jak i orientacji.

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Zweryfikowano wpływ poszczególnych dodatków na właściwości biokompozytów, istotne dla zastosowań w sektorze opakowaniowym;
- Określono wymagane parametry przetwórcze dla kompozytów włóknistych zawierających włókna celulozowe;
- Zweryfikowano korelację pomiędzy geometrią wykorzystanych napełniaczy, a właściwościami użytkowymi biokompozytów.

Publikacja 6

Stanisław Frąckowiak. Sustainable Approaches to Plastics. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023, vol. 25, pp. 128-140
<https://doi.org/10.54740/ros.2023.013>

Ostatnia z przedstawionych w osiągnięciu prac, w odróżnieniu od pozostałych, jest pracą przeglądową i stanowi niejako próbę holistycznego podejścia do zagadnienia zrównoważonej polityki w stosunku do wyrobów i w konsekwencji odpadów z tworzyw sztucznych. Głównym aspektem badawczym pracy jest określenie światowych trendów w pracach badawczych (o zasięgu światowym, opublikowanych na przestrzeni ostatnich 4 lat) dotyczących minimalizacji ilości odpadów z tworzyw sztucznych w środowisku naturalnym. Z uwagi na szeroki zakres omawianego zagadnienia, sprowadzono je do dwóch podstawowych metod. Ponownego wykorzystania powstałych odpadów z TS, czyli stosowanych obecnie metod recyklingu oraz wykorzystania zamienników konwencjonalnych polimerów ropopochodnych w postaci biodegradowalnych materiałów polimerowych. Na przykładzie przytoczonych prac przeanalizowano obecnie wykorzystywane metody recyklingu, z uwzględnieniem takich czynników jak ekonomia przedsięwzięcia, stopień degradacji materiału, właściwości końcowe materiału, zakres zastosowań. Uwzględniono też względnie nowe zagadnienia, jak na przykład eko-projektowanie pod kątem przydatności danego wyrobu do powtórnego przetwórstwa. Przedstawiono dostępne zastosowania odpadowych materiałów polimerowych z podziałem na poszczególne rodzaje wyrobów z odpadowych tworzyw sztucznych i ich kompozytów (sztuczne drewno, dodatki do cementu, filtry, paliwa i inne). Dodatkowym aspektem badawczym była analiza obecnych poziomów rozwoju osobnej gałęzi materiałów polimerowych, jakimi są polimery ropopochodne, lecz produkowane częściowo z wykorzystaniem surowców odnawialnych (do ich produkcji wykorzystywany jest bioetanol produkowany z biomasy czy też biodegradowalnej

części odpadów pochodzących głównie z przemysłu papierniczego). Określono aplikacyjność i przybliżony udział rynkowy dla obecnie stosowanych biopolimerów w zależności od źródeł ich powstawania (ekstrahowane bezpośrednio z biomasy, syntezowane z monomerów pochodzących z surowców odnawialnych, produkowanych z wykorzystaniem mikroorganizmów). Dokonano porównania dostępnych scenariuszy zastąpienia czy też zminimalizowania udziału TS i ich odpadów w środowisku naturalnym. Przeprowadzona analiza literaturowa pozwoliła stwierdzić, że udział biopolimerów na rynku tworzyw sztucznych jest obecnie nadal znacznie mniejszy od ich konwencjonalnych odpowiedników (głównie z uwagi na nadal większe koszty produkcji, rzadziej na właściwości), jednakże rozwój jest na tyle znaczący, iż tylko kwestią czasu jest, kiedy to biodegradowalne polimery ze źródeł odnawialnych będą tymi dominującymi. Stąd też na obecnym etapie konieczne jest dalsze utrzymanie wielkoskalowego recyklingu TS w celu ograniczenia czy też eliminacji zagrożeń płynących od tego typu odpadów.

Najważniejsze aspekty poznawcze wynikające z przeprowadzonych badań:

- Określono obecne trendy dla obecnie stosowanych metod recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych;
- Wskazano wiodące ścieżki rozwoju dla biodegradowalnych polimerów produkowanych z surowców odnawialnych;
- Opracowano analizę porównawczą obu metod wdrażania polityki zrównoważonego rozwoju w odniesieniu do tworzyw sztucznych;
- Wskazano obszary zastosowań, gdzie aplikacyjność biopolimerów, z uwagi na ich biokompatybilność, jest w zasadzie silnie uzasadniona (np. implanty stosowane w medycynie) – analizę tej grupy materiałów zawarłem w publikacji nie przedstawionej w omawianym cyklu [zał. 4, poz. C. 1]

Podsumowanie

W powyższym cyklu publikacji przedstawiono analizę możliwości zastosowania kilku wybranych biodegradowalnych polimerów, pochodzących z surowców odnawialnych jako zamienników dla ich konwencjonalnych, ropopochodnych odpowiedników. Mając na uwadze gdzie obecnie powstaje największy wolumen odpadów z TS, skupiono się na zastosowaniach w sektorze opakowań. Właściwości przedstawionych tutaj materiałów

biokompozytowych jednoznacznie udowadniają, iż ich zakres aplikacyjności nie ogranicza się tylko do typowych, mało ambitnych produktów jak np. sztućce, słomki, worki na odpady itp. Publikacja 1 pozwoliła mi określić niezbędne parametry procesu wytwarzania biokompozytów zawierających nanorozmiarowy napełniacz, dzięki któremu możliwe było nadanie materiałowi odpowiedniej funkcjonalności. W tym przypadku opakowań do wyrobów wrażliwych na promieniowanie elektromagnetyczne, jak i wyładowania elektrostatyczne. Dzięki wynikom uzyskanym w trakcie realizacji omawianych tutaj eksperymentów możliwy był dobór rodzaju, jak i sposobu przygotowania zastosowanego tutaj napełniacza, celem uzyskania optymalnego stopnia dyspersji, a w rezultacie ograniczenia rozrzutów we właściwościach otrzymanych biokompozytów. Po dopracowaniu założeń wytwarzania nowych materiałów biokompozytowych, dalsze kroki ujęte w Publikacji 2 polegały na poszerzeniu zakresu wprowadzanych napełniaczy o napełniacze mineralne, opracowaniu metody modyfikacji struktury otrzymywanych materiałów poprzez wprowadzanie gazu w stanie lepkosprężystym w celu zmniejszenia ich gęstości, analizie potencjału aplikacyjnego w kierunku materiałów mogących znaleźć zastosowanie jako materiały czujnikowe. Dysponując zdobytymi do tej pory doświadczeniami zaproponowałem w Publikacji 3 dalsze prace rozwojowe, mające na celu wprowadzenie dodatkowej zmiennej, jaką była mieszanina biopolimerów zastosowana do wytwarzania biokompozytów. Rozwiązany też został problem wdrażania dodatkowej modyfikacji, jaką był proces orientacji wytworzonych materiałów, gwarantujący anizotropię wybranych właściwości, pożądaną z punktu widzenia niektórych aplikacji opakowaniowych. Kolejnym etapem prac badawczych było poszukiwanie takiej mieszaniny biopolimerów, dla której możliwa byłaby do uzyskania synergia właściwości obu jej składników. To uzyskałem w Publikacji 4 gdzie analiza różnych udziałów PLA do PBAT pozwoliła na wytypowanie składu o właściwościach (przede wszystkim wytrzymałościowych) przewyższających te od obu składników z osobna. Wartością dodaną na tym etapie było oszacowanie wpływu modyfikacji chemicznej, nie stosowanej wcześniej w tym cyklu publikacji, za pomocą środka wydłużającego łańcuchy polimerów. Wprowadzone modyfikacje nie zmniejszyły dobroczynnego wpływu pozostałych składników kompozytu na jego właściwości barierowe, utrzymując jego potencjał aplikacyjny w zakresie opakowań do żywności. Na dalszym etapie prac, w Publikacji 5, określono w możliwie kompleksowy sposób wpływ parametru, jakim jest geometria napełniacza (w kategoriach współczynnika proporcji) na właściwości funkcjonalne opracowywanych

materiałów. Potwierdzono, że możliwość modyfikacji właściwości biokompozytów poprzez stosowanie różnego typu napelnaczy ma sens i jest w stanie znacznie poszerzyć ich podstawowy zakres stosowalności. Ostatecznie w Publikacji 6 zweryfikowałem i usystematyzowałem możliwe scenariusze aplikacji zrównoważonego rozwoju w kontekście tworzyw sztucznych i odpadów z nich powstających. W oparciu o analizę literaturową wykazałem, iż zaproponowany tutaj scenariusz stopniowego zastępowania ropopochodnych tworzyw polimerowych przez biopolimery ma sens i jest obecnie realizowany przez liczne zespoły badawcze na całym świecie.

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

przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Po ukończeniu w 1998 roku XXIII Liceum Ogólnokształcącego we Wrocławiu, podjąłem jednolite studia magistersko-inżynierskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Kierunek Inżynieria Materiałowa, z końcem studiów zmieniony przez władze Wydziału na kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Inżynieria Materiałowa. Specyfika kierunku/specjalności opierała się na interdyscyplinarności, łącząc dyscypliny wydziałów Mechanicznego i Chemicznego. Tam też po raz pierwszy zetknąłem się z zagadnieniami związanymi z przetwórstwem tworzyw polimerowych, materiałów kompozytowych, mieszanin itd. Rezultatem tego była obrona pracy magisterskiej „Kompozyty elektroprzewodzące” w 2003r.

Po zakończeniu studiów na wydziale mechanicznym, podjąłem studia doktoranckie w zespole prof. Marka Kozłowskiego. Zespół wpierw wchodził w struktury Wydziału Mechanicznego, aby później przenieść się na Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Oprócz pogłębiania zagadnień związanych z moją pracą doktorską uczestniczyłem w realizacji wielu projektów naukowo-badawczych. Jednym z pierwszych było

- Centrum Doskonałości Recyklingu Materiałów MAREC, utworzone decyzją Unii Europejskiej w 2002 r. jako wiodący ośrodek recyklingu w Europie Centralnej i Wschodniej współpracujący z Virtual European Recycling Center, Hiszpania, APME Bruksela, PETCORE Bruksela, koordynator Międzynarodowej Sieci Recyklingu Materiałów 3RNET, partner merytoryczny periodyku „Recykling Review”. Utworzone w ramach GROWTH-2002 Centre of Excellence, 5FP.

Wspomniane Centrum było konglomeratem zespołów badawczo-dydaktycznych zajmujących się recyklingiem wielorakich grup materiałów, w skład których wchodziły odpady z tworzyw sztucznych, odpady budowlane, z przemysłu samochodowego i inne. W ramach prac Centrum uczestniczyłem przy pracach badawczych dotyczących odpadów z tworzyw sztucznych, organizowaniu seminariów, warsztatów i konferencji. Z perspektywy czasu, stwierdzam, iż praca przy działaniach Centrum pozwoliła mi na zdobycie tak potrzebnego doświadczenia, docenienia multidyscyplinarnego podejścia do realizacji tematów badawczych oraz zdobycia kontaktów z zespołami realizującymi zagadnienia związane z recyklingiem w Polsce i na świecie.

W latach 2004-2008 realizowaliśmy dwa większe projekty (zał. 4, poz. D.11 oraz D.10):

- New classes of Engineering Composites Materials from Renewable Resources „BIOCOMP” [zał. 4, poz. D.10]
- Innovative Molecular modeling approach to upgrade polymeric materials from post industrial rejects “MOMO” [zał. 4, poz. D.11]

W obu równolegle realizowanych tematach badawczych uczestniczyłem w pracach międzynarodowych konsorcjów i tak:

Projekt D10 dotyczył wpływu modyfikacji (chemicznej, fizycznej) włókien naturalnych (len, konopie, szał i inne) na właściwości kompozytów wykonanych na podstawie polimerów biodegradowalnych, takich jak poli(kwas mlekowy).

Moje zaangażowanie w realizację D.10 było w większości ograniczone do wykonywania różnego rodzaju badań właściwości (reologicznych, wytrzymałościowych) otrzymanych kompozytów, jak i surowców wejściowych. W ramach projektu opracowane zostały nowe materiały kompozytowe z w/w składników o polepszonych wybranych właściwościach użytkowych oraz jak zostało wykazane poprzez technikę oceny cyklu życia *LCA Life Cycle Assessment*, o zauważalnie lepszych aspektach środowiskowych i potencjalnych wpływach na środowisko. Doświadczenia wyniesione z realizacji projektu były szczególnie istotne, ponieważ miałem możliwość po raz pierwszy zetknąć się z przetwórstwem polimerów pochodzących ze źródeł odnawialnych, jak i poznać ich wpływ na środowisko naturalne.

Drugi z omawianych projektów (D. 11) dotyczył opracowania innowacyjnych metod recyklingu polimerów pochodzenia wtórnego z elementów lamp samochodowych. Stosowany tutaj recykling mechaniczny nie był niczym nowym,

jednakże dążenie do poprawy właściwości przetwarzanych odpadów na drodze domieszkiwania w stopie nanorozmiarowych napełniaczy pochodzenia mineralnego miało znaczny potencjał aplikacyjny. Stąd też jednym z głównych partnerów odpowiedzialnych za wdrożenie wyników projektu było Centro Ricerche Plastica (Amaro, Włochy) wchodzące w skład grupy Fiata. W projekcie byłem odpowiedzialny za wykonanie kompozytów na osnowie polimerów pochodzących z zużytych lamp samochodowych, napełnianych mineralnymi nanonapełniaczami. Oprócz tego zajmowałem się też oceną właściwości przetwórczych, wytrzymałościowych, stopnia dyspersji napełniaczy w otrzymanych kompozytach oraz uczestniczyłem w modyfikacji technologii przetwórstwa w oparciu o uzyskane dane.

Wstępne wyniki badań realizowanych w ramach doktoratu zostały przedstawione w publikacji:

- *Marek Kozłowski, Stanisław Frąckowiak. Chemical sensors based on polymer composites. Sensors and Actuators. B, Chemical. 2005, vol. 109, iss. 1, s. 141-145. [zal. 4, poz. C.18]*

Również w 2005 roku uczestniczyłem w kilkudniowych warsztatach „*Rheological Measurements*” organizowanych przez Wydział Inżynierii Chemicznej Katolickiego Uniwersytetu w Leuven, Belgia. Umożliwiły mi zapoznanie się z nowymi metodami pomiarów właściwości lepkosprężystych materiałów polimerowych, poznanie najnowszych jak na tamte czasy urządzeń pomiarowych oraz usystematyzowanie już posiadanej w tym temacie wiedzy.

Dalsze moje prace nadal zorientowane były na materiały wykonane z tworzyw polimerowych, ich szeroko pojęty recykling oraz materiały „naturalne” (ze źródeł odnawialnych). Przykładowym rezultatem takiej pracy była publikacja:

- *Marek Kozłowski, Sławomir Szczurek, Tomasz Szczurek, Stanisław Frąckowiak. Influence of matrix polymer on melt strength and viscosity of wood flour reinforced composites. International Journal of Material Forming. 2008, vol. 1, suppl. 1, s. 751-754. [zal. 4, poz. C.17]*

po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Dotychczas przeprowadzone badania pozwoliły mi na opanowanie zasad kierujących projektowaniem i przetwarzaniem kompozytów/mieszanin polimerowych oraz poznanie zależności pomiędzy składem, technologią przetwarzania, modyfikacją a wpływem tych czynników na właściwości końcowe omawianych materiałów. Jednakże

wymagały również rozwinięcia w kierunku materiałów polimerowych o bardziej neutralnym wpływie na środowisko. Dlatego też dalsze swoje zainteresowania zawodowe skierowałem w stronę polimerowych materiałów biodegradowalnych, jak i też możliwie nowych metod recyklingu tworzyw „konwencjonalnych”, ropopochodnych.

W międzyczasie opublikowałem dwa artykułów będące podsumowaniem wyników otrzymanych w trakcie opracowywania pracy doktorskiej:

- Stanisław Frąckowiak, Marek Kozłowski. *Polimerowe kompozyty elektroprzewodzące jako materiały o potencjale sensorycznym. Polimery. 2010, t. 55, nr 5, s. 390-398.*[zał. 4, poz. C.14]
- Stanisław Frąckowiak, Monika Maciejewska, Andrzej Szczurek, Marek Kozłowski. *Polymer composites as sensing materials for liquid organic solvents - preliminary results. e-Polymers. 2011, nr 32, s. 1-9.* [zał. 4, poz. C.12]

Wstępne założenia co do “zielonych” materiałów polimerowych zostały przetestowane przy realizacji projektu:

- Nowe, przyjazne dla środowiska kompozyty polimerowe z wykorzystaniem surowców odnawialnych. [zał. 4, poz. D9]

Głównym celem projektu była ocena możliwości implementacji surowców odnawialnych do tworzyw polimerowych. Pod względem wykorzystywanych surowców zakres był bardzo szeroki. Od „klasycznych” polimerów, takich jak polietylen (PE), polipropylen (PP), poli(chlorek winylu) (PVC), po materiały z surowców odnawialnych, takie jak skrobia (modyfikowana do skrobi termoplastycznej). Liderem projektu był GIG, Katowice, partnerami zaś AGH, Politechnika Krakowska, Politechnika Wrocławska, Instytutu Chemii Przemysłowej w Warszawie, Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu, Uniwersytet Opolski oraz Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy. Mój udział przy realizacji projektu dotyczył bezpośrednio wykonania części kompozytów, jak i oceny ich właściwości. Rezultatem projektu była seria materiałów o zróżnicowanych właściwościach, łączących w sobie składniki z surowców odnawialnych i nieodnawialnych.

Równolegle zaś uczestniczyłem przy realizacji projektu, którego cele nie dotyczyły aspektów środowiskowych, a ukierunkowane były na otrzymanie materiałów o pożądanym właściwościach użytkowych.

- Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach „NanoMat”. [zał. 4, poz. D.8]

Projekt NanoMat realizowany był pod kierownictwem Wrocławskiego Centrum Badań EIT+. Zakres projektu był bardzo szeroki, obejmował 10 zagadnień badawczych. Osobiście zaangażowany byłem w zadanie 3 „Funkcjonalne Materiały Polimerowe”, jako że tematyka tego zadania odpowiadała moim dotychczasowym doświadczeniom, zebranych w trakcie prowadzenia badań do pracy doktorskiej. Projekt miał charakter stricte aplikacyjny, a w trakcie jego trwania mój udział polegał na opracowywaniu nowych kompozytów elektroprzewodzących, zawierających wybrane nanonapełniacze (nanorurki węglowe i inne).

W latach 2009-2013 uczestniczyłem w realizacji projektu badawczego, będącego dalszym etapem rozwoju polimerów ze źródeł odnawialnych.

- Polimerowe chirurgiczne systemy resorbowalne z pamięcią kształtu „MEMSTENT”. [zał. 4, poz. D.7]

Część polimerów produkowane ze źródeł odnawialnych swój początek wywodzi z zastosowań w medycynie. Przykładowo, produkowany obecnie na szeroka skalę poli(kwas mlekowy) (PLA) stosowany, np. w przemyśle opakowaniowym, do produkcji filamentów w druku metodą przyrostową i innych zastosowań. Jeszcze w drugiej połowie XX wieku pierwsze komercyjne zastosowania PLA dotyczyły implantów medycznych, z uwagi na dużą biokompatybilność tego materiału, jako że jego podstawowy składnik, kwas mlekowy, występuje w organizmach żywych. Stąd też celem kolejnego z projektów, w których uczestniczyłem, była nowatorska metoda aplikacji PLA jako materiału do produkcji implantów chirurgicznych. Rezultatem projektu było opracowanie nowej generacji systemów chirurgicznych z pamięcią kształtu indukowaną pod wpływem temperatury ludzkiego ciała. Liderem było Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych Polskiej Akademii Nauk, pozostali partnerzy to: Śląskie Uniwersytet Medyczny w Katowicach oraz Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej. W projekcie byłem zaangażowany w opracowywanie zagadnień związanych z opracowywaniem właściwej receptury materiału, programowanie efektu pamięci kształtu oraz ocenę właściwości użytkowych i przetwórczych otrzymanych struktur.

W trakcie dalszego pogłębiania swojej wiedzy nt. polimerów biodegradowalnych oraz ograniczania zużycia konwencjonalnych tworzyw polimerowych poprzez wytwarzanie struktur o obniżonej gęstości, powstały następujące publikacje:

- *Andrzej Iwańczuk, Marek Kozłowski, Stanisław Frąckowiak. Wpływ modyfikacji włókien naturalnych na właściwości kompozytów biodegradowalnych na osnowie PLA. Czasopismo Techniczne. M, Mechanika = Technical Transactions. M, Mechanics. 2009, R. 106, z. 1-M, s. 119-123. [zał. 4, poz. C.15]*
- *Marek Kozłowski, Anna Kozłowska, Stanisław Frąckowiak. Materiały polimerowe o strukturze komórkowej. Polimery. 2010, t. 55, nr 10, s. 726-739. [zał. 4, poz. C.13]*

Z uwagi na konieczność rozszerzenia zakresu materiałów polimerowych mogących stanowić alternatywę dla konwencjonalnych tworzyw sztucznych, kolejną grupą polimerów, jakie badałem, były polihydroksyalkaniany (PHA). Są to materiały szczególnie interesujące w kontekście zrównoważonej gospodarki, jak i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko z uwagi na następujące cechy:

- biodegradowalne, biokompatybilne
- produkowane przez mikroorganizmy
- obecnie zidentyfikowano ponad 150 różnych monomerów, co pozwala otrzymywać materiały o zróżnicowanych właściwościach

W latach 2008-2013 kontynuowałem swoje badania, uczestnicząc między innymi w realizacji projektu:

- Materiały opakowaniowe nowej generacji z tworzywa polimerowego ulegającego recyklingowi organicznemu „MARGEN” [zał. 4, poz. D.6].

Projekt był realizowany przez konsorcjum złożone z Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN w Zabrze (Lider projektu), Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi oraz Politechnikę Warszawską, Politechnikę Wrocławską, Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu oraz Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Opakowań w Warszawie. Celem projektu było opracowanie założeń procesu technologicznego wytwarzania tworzyw polimerowych (polimerów, mieszanek polimerowych oraz nanokompozytów), ulegających degradacji w warunkach kompostowania przemysłowego oraz opracowanie założeń procesu otrzymywania z tych tworzyw folii, przeznaczonych zarówno

do użycia bezpośredniego, jak i do wytwarzania sztywnych opakowań nowej generacji, głównie dla produktów spożywczych, metodą termoformowania. Polimery biodegradowalne badane w projekcie to wspomniane wcześniej PLA, jak i PHA oraz kopoliestry alifatyczno-aromatyczne (PBTA). Mój udział w projekcie sprowadzał się do realizacji części zadań dotyczących przygotowywania mieszanin i kompozytów na podstawie materiałów opracowanych przez inne jednostki, oceny właściwości reologicznych, jak i analizie wpływu procesów przetwórczych na wybrane właściwości opracowywanych materiałów. Rezultatem projektu było opracowanie możliwości aplikacyjnych dla komercyjnie dostępnych poliestrów alifatycznych, takich jak polilaktyd oraz poli(3-hydrok-syalkaniany), jako komponentów sztywnych, kompostowalnych materiałów opakowaniowych.

Dalsze moje prace badawcze w następnych latach polegały na kontynuacji tematów związanych z recyklingiem tworzyw polimerowych, aplikacją polimerów biodegradowalnych jako osnowy dla materiałów kompozytowych jak i opracowywaniem nowych kompozytów funkcjonalnych. Rezultatem tego były następujące publikacje:

- *Stanisław Frąckowiak, Monika Maciejewska, Andrzej Szczurek, Marek Kozłowski. Polymer composites as sensing materials for liquid organic solvents - preliminary results. e-Polymers. 2011, nr 32, s. 1-9. [zał. 4, poz. C.12]*
- *Stanisław Frąckowiak, Marek Kozłowski. Influence of filler geometry on melt strength of poly(lactid acid) composites with different electrically conductive fillers. Key Engineering Materials. 2014, vol. 605, s. 449-452. [zał. 4, poz. C.11]*
- *Kaushik Pal, Madhumita Mukherjee, Stanisław Frąckowiak, Marek Kozłowski, Chapal K. Das. Improvement of the physico-mechanical properties and stability of waste polypropylene in the presence of wood flour and (maleic anhydride)-grafted polypropylene. Journal of Vinyl & Additive Technology. 2014, vol. 20, nr 1, s. 24-30. [zał. 4, poz. C.10]*
- *Stanisław Frąckowiak, Marek Kozłowski. Shape specific electrically conductive fillers in poly(lactid acid) composites for strain sensing applications. Sensor Letters. 2014, vol. 12, nr 8, s. 1299-1302. [zał. 4, poz. C.9]*
- *Stanisław Frąckowiak, Eugeniusz Zych, Marek Kozłowski, Leszek Kępiński. Modifying the luminescence characteristics of Lu₂O₃:Eu large nanocrystals*

with polycarbonate host. Polymer Composites. 2016, vol. 37, nr 5, s. 1330-1334.
[zał. 4, poz. C.8]

- *Stanisław Frąckowiak, Joanna Ludwiczak, Karol J. Leluk, Marek Kozłowski. Halloysite with iron oxide inclusions as a soft ferromagnetic filler for polymer composites. Polymers and Polymer Composites. 2017, vol. 25, nr 6, s. 489-494.*
[zał. 4, poz. C.7]
- *Joanna Ludwiczak, Stanisław Frąckowiak, Rafał Łużny. Effect of recycling on the cellular structure of polylactide in a batch process. Cellular Polymers. 2018, vol. 37, nr 2, s. 69-79.* [zał. 4, poz. C.6]

W latach 2017-2018 realizowałem kolejne zadanie badawcze, gdzie w dwuosobowym zespole w ramach dużego Bonu na Innowacje opracowana została technologia recyklingu odpadów budowlanych z prac termomodernizacyjnych dla firmy Ekologis, Wrocław

- Opracowanie technologii odzysku polistyrenu z odpadowego styropianu budowlanego. [zał. 4, poz. D.4]

Przedmiotem projektu było opracowanie technologii odzysku polistyrenu z odpadowego styropianu budowlanego według założeń technologii przetwórstwa odpadów budowlanych ekspandowanego polistyrenu. Zakres projektu obejmował dwuetapowy proces odzysku, składający się z rozpuszczenia surowca i odfiltrowania zanieczyszczeń nierozpuszczalnych (recykling chemiczny). W ramach recyklingu chemicznego określone zostały: właściwości surowca wejściowego, a także najbardziej optymalny zestaw rozpuszczalników do wykorzystania w procesie rozpuszczania. Sama metoda oczyszczania odpadu nie była niczym nowym, jednakże projekt bronił się możliwie niskim stopniem oddziaływania na środowisko. Opracowana w trakcie trwania projektu instalacja do oczyszczania miała zaimplementowany układ zawracania i ponownego użycia wykorzystanego rozpuszczalnika oraz sam rozpuszczalnik był pochodzenia naturalnego. Do rozpuszczania ekspandowanego polistyrenu wykorzystano d-limonen, substancję pochodzenia naturalnego.

Rezultatem było opracowanie i przekazanie beneficjentowi technologii, jak w temacie projektu. Mój wkład w projekt był na każdym z etapów jego realizacji. Przygotowanie wniosku, przegląd literaturowy, próby technologiczne, ocena właściwości otrzymanych recyklatów, jak i przygotowanie końcowego raportu.

W trakcie kilku kolejnych lat (2017-2022) uczestniczyłem w realizacji dalszych projektów badawczych, dotyczących różnorodnych zastosowań polimerów biodegradowalnych i pochodzących ze źródeł odnawialnych, a konkretnie:

- Conversion of phytogenic silica reach food industry by-products into value-added products “Convert-Si”. [zał. 4, poz. D.3]

Projekt dotyczył wykorzystania odpadowych materiałów pochodzenia naturalnego, celulozy jako napełniacza do kompozytów przeznaczonych na surowiec do produkcji opakowań. Jednostki współpracujące przy realizacji to ICECHIM Rumunia, MKF Ergis oraz Politechnika Wrocławska.

Realizowane zadania były dość ambitne, jako że w pierw celuloza przetwarzana była do formy włókien na drodze względnie nowej techniki jaką było elektroprzędzenie z roztworu dalej wprowadzana do matryc polimerowych, dostępnych na rynku polimerów ze źródeł odnawialnych. Prace przeprowadzone w projekcie pozwoliły na opracowanie technologii przetwarzania odpadowej celulozy do formy nanowłókien i wytworzenie na skalę laboratoryjną w pełni biodegradowalnego materiału kompozytowego o dużym potencjale aplikacyjnym w sektorze opakowań. Na szczególną uwagę w projekcie zasługuje połączenie recyklingu (ponowne wykorzystanie odpadowej celulozy) z biopolimerami. Mój wkład w realizację projektu dotyczył realizacji zadań poświęconych opracowaniu parametrów procesu elektroprzędzenia, określeniu charakterystyki reologicznej wykorzystanych roztworów, określeniu właściwości fizyko-chemicznych otrzymanych struktur.

- Biocomposite Packaging for Active Preservation of Food "BioFoodPack". [zał. 4, poz. D.2]

Liderem projektu był Uniwersytet w Aveiro (Portugalia), pozostali uczestnicy konsorcjum to jednostki badawcze oraz firmy z Portugalii, Cypru i Polski. Projekt dotyczył opracowania nowego biodegradowalnego materiału opakowaniowego do żywności, wydłużającego termin przydatności do spożycia, jednocześnie umożliwiając niskotemperaturową sterylizację żywności w pulsacyjnym polu elektrycznym (PEF). Jako że moje dotychczasowe prace, jak i zgromadzone na tym etapie doświadczenie, dotyczyły zarówno elektroprzewodzących materiałów kompozytowych, jak i biopolimerów/biokompozytów, byłem w projekcie odpowiedzialny ze realizację większości zadań badawczych, które były po stronie Politechniki Wrocławskiej. Z uwagi na specyficzny charakter

aplikacji otrzymanych materiałów (kontakt z żywnością) konieczne było spełnienie wielu warunków dla opracowywanych materiałów (odpowiednia przenikalność par i gazów, odporność na działanie wilgoci, odpowiednia przewodność elektryczna i innych). W trakcie realizacji projektu opracowano rodzinę materiałów kompozytowych na osnowie biodegradowalnych tworzyw z surowców odnawialnych, opisano większość możliwych zależności pomiędzy właściwościami fizyko-chemicznymi kompozytów a ich strukturą, wdrożono pilotażową produkcję, przeprowadzono badania na ludziach celem określenia ewentualnej migracji składników opakowań do żywności. Mój wkład w realizację projektu dotyczył realizacji zadań związanych z otrzymywaniem kompozytów elektroprzewodzących, oceną właściwości, wdrażaniem opracowywanych materiałów do produkcji opakowań.

- Opracowanie innowacyjnych, wymiennych struktur energochłonnych kasków ochronnych na bazie tworzyw biodegradowalnych „Biokask”. [zał. 4, poz. D.1] Ostatnim z projektów, w jakie do tej pory byłem zaangażowany, był projekt Biokask, dotyczący opracowania nowego rodzaju struktury energochłonnej mającej zastosowanie jako wkładki ochronne do kasków sportowych. Do wytworzenia wspomnianych elementów wykorzystano biodegradowalne polimery ze źródeł odnawialnych. Mój udział w projekcie dotyczył wytworzenia części mieszanin oraz przeprowadzenia prób technologicznych na drodze wtrysku.

W wyniku przeprowadzonych prac, jak i też innych aktywności, w międzyczasie powstały następujące publikacje:

- *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. [zał. 4, poz. C.5]*
- *Joanna Ludwiczak, Stanisław Frąckowiak, Karol J. Leluk, Beata E. Hanus-Lorenz. A fully biodegradable PLA/PBS composite reinforced with wood flour. Cellulose Chemistry and Technology. 2019, vol. 53, nr 9/10, s. 955-962. [zał. 4, poz. C.4]*
- *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. [zał. 4, poz. C.3]

- *Arkadiusz Pawlik, Stanisław Frąckowiak, Karol J. Leluk. The effectiveness of fiber-reinforced natural composites compared to the elastomer materials produced from nonrenewable resources in vibration transmission suppression. Building Acoustics. 2020, vol. 27, nr 4. s. 357-366. [zał. 4, poz. C.2]*
- *Raluca N. Darie-Niță, Maria Râpă, Stanisław Frąckowiak. Special features of polyester-based materials for medical applications. Polymers. 2022, vol. 14, nr 5, art. 951, s. 1-49. [zał. 4, poz. C.1]*

Co warto nadmienić, na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat współpracowałem z wieloma jednostkami krajowymi, jak i zagranicznymi, głównie przy realizacji projektów badawczych, wniosków o dofinansowanie oraz konferencji. Jednakże, na podkreślenie zasługuje współpraca z Institute of Macromolecular Chemistry Petru Poni (ICMPP), Iasi, Rumunia. Wielokrotnie realizowaliśmy działania badawcze w dziedzinie biokompozytów, jak i biopolimerów. Cyklicznie co dwa lata realizujemy projekty na podstawie współpracy naukowej pomiędzy Polską Akademią Nauk a Romanian Academy, w ramach których realizowane są krótkoterminowe (ok. 14 dni, w zależności od przyznanych na dany rok limitów wymiany osobowej) wymiany osobowe pomiędzy naszymi jednostkami, owocujące wspólnymi wnioskami projektowymi, jak i też publikacjami (np. poz. C1, zał.4). Zaświadczenie o moim pobycie w ICMPP we wrześniu roku 2022 załączam w zał. 6, str. 16.

Dla poniżej wymienionych projektów PAN-RAN jestem koordynatorem po stronie polskiej:

- 2016-2018 – Innowacyjne Przetwarzanie Polimerów
- 2023-2025 – Zrównoważone Hybrydowe materiały Polimerowe do Zastosowań Przyjaznych Środowisku

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

- otrzymałem Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej w latach 2017, 2018, 2019, 2021 (zał. 6, str. 1-4)

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

- w 2012 ukończyłem Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej (zał. 6, str. 5)
- od 2017 jestem opiekunem koła naukowego Tworzyw Sztucznych i Recyklingu „Ekomery” (obecnie sekcja tematyczna koła Environmental Team) na wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej (zał. 6, str. 6)
- od 2021 do teraz pełnię funkcję pełnomocnika Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska do spraw Studenckich Praktyk Zawodowych (zał. 6, str. 7)

.....
(podpis wnioskodawcy)