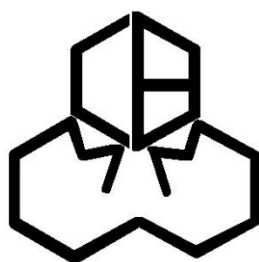


Załącznik 4. Podsumowanie osiągnięć zawodowych (Autoreferat)

dr Hanieh Kargarzadeh

**Nanopolisacharydy i nanopolifenole ze źródeł naturalnych jako
wielofunkcyjne zielone materiały polimerowe**



**Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk
(CBMM PAN)
Łódź, Styczeń 2025**

Spis treści

1. Podstawowe Informacje	3
2. Dyplomy i Stopnie Naukowe	3
3. Informacje o Poprzednim Zatrudnieniu	4
4. Opis Osiągnięć, o Których Mowa w Art. 219 Ust. 1 Pkt 2 Ustawy.....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:	4
4.2. Wykaz opublikowanych prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej i wkładu wnioskodawcy:	5
4.3. Przedstawienie celu naukowego opublikowanych prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej oraz uzyskanych wyników z omówieniem ich potencjalnego zastosowania. 10	
5. Prezentacja Znaczącej Działalności Naukowej lub Artystycznej Prowadzonej w Więcej Niż Jednej Uczelni, Instytucji Naukowej lub Kultury, w Szczególności w Instytucjach Zagranicznych	38
6. Prezentacja Osiągnięć Dydaktycznych i Organizacyjnych Oraz Osiągnięć w Dziedzinie Popularyzacji Nauki Lub Sztuki	40
7. Oprócz Informacji Określonych w Punktach 1-6 Powyżej, Wnioskodawca Może Dołączyć Inne Informacje Dotyczące Swojej Kariery Zawodowej, Które Uznaje Za Ważne.	40
7.1. Przebieg pracy badawczej przed uzyskaniem stopnia doktora:	40
7.2. Przebieg pracy badawczej po uzyskaniu stopnia doktora:	43
8. Wykaz skrótów	47
9. Odniesienia	48

1. Podstawowe Informacje

Hanieh Kargarzadeh (data urodzenia: 21 września 1981)

Adiunkt w Dziale Materiałów Nanopolimerowych w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk

Podsumowanie najważniejszych osiągnięć: moje główne osiągnięcia dotyczą przede wszystkim zrównoważonej nauki o materiałach i nanotechnologii, ze szczególnym uwzględnieniem nanopolisacharydów (takich jak nanoceluloza) i nanopolifenoli (takich jak nanolignina), współautorstwo 47 publikacji (łącznie IF 2024=288), 8 rozdziałów książek, współredaktor książki, liczba cytowań 3760 (Web of Science), 4416 (Scopus), 6345 (Google Scholar), indeks Hirscha 24 (WoS), 25 (S), 32 (GS), wykonawca i główny badacz 6 projektów badawczych, współpromotor 4 doktorantów, współpromotor 1 magistranta, recenzent czasopisma naukowego (łącznie ponad 70 recenzji), prezynter ustny i plakatowy na 23 konferencjach międzynarodowych i krajowych, 1 wykład plenarny i 2 wykłady zaproszone na konferencjach międzynarodowych, obecnie członek Redakcji oraz członek rady recenzentów 3 czasopism naukowych, notowana przez Uniwersytet Stanforda na liście 2% najlepszych naukowców na świecie przez pięć kolejnych lat.

2. Dyplomy i Stopnie Naukowe

➤ Doktor Nauk

Specjalność: Chemia, data otrzymania stopnia 26.10.2013

Wydział Nauki i Technologii, Szkoła Nauk Chemicznych i Technologii Żywności, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)

- Tytuł rozprawy: Opracowanie nanokompozytu poliestier/guma naturalna w postaci ciekłej wzmocnionego nanokryształami celulozy z włókien kenafu
- Promotor: Prof. Dr. Ishak Ahmad
- Współpromotorzy: Prof. Dr. Ibrahim Abdullah (Emeritus, Wydział Nauki i Technologii, Szkoła Nauk Chemicznych i Technologii Żywności, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)) oraz Prof. Dr. Alain Dufresne (Uniwersytet Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LGP2, Grenoble F-38000, Francja)

➤ Magister Nauk

Specjalność: Chemia Organiczna, ukończone 08.03.2007

Wydział Inżynierii, Islamski Uniwersytet Azad w Gachsaran, Gachsaran, Iran

- Tytuł pracy magisterskiej: Kwas wolframowo-siarczanowy (TSA)/KMnO₄ jako nowy heterogeniczny system do szybkiego odwodorniania oksymów
- Promotor: Prof. Dr. Bahador Karami
- Współpromotor: Prof. Dr. Khodabakhsh Niknam

➤ Licencjat Nauk

Specjalność: Chemia Stosowana, ukończone 21.07.2003

Wydział Inżynierii, Islamski Uniwersytet Azad w Gachsaran, Gachsaran, Iran

3. Informacje o Poprzednim Zatrudnieniu

- **Badacz podoktorancki**, Wydział Nauki i Technologii, Szkoła Nauk Chemicznych i Technologii Żywności, Centrum Badań nad Polimerami (PORCE), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), 01.02.2014 – 31.07.2017
- **Kierownik kontroli jakości** w Jahan Khorma Medical Ethyl Alcohol Factory of Bushehr, Iran, 2003-2004
- **Wykładowca** w Azad University of Alishahr, Bushehr, Iran, 2007-2008
- **Wykładowca** w Al-Zahra Technical College of Bushehr, Iran, 2007-2008
- **Nauczyciel** w Behesht Aeen High School, Bushehr, Iran, 2004-2006

4. Opis Osiągnięć, o Których Mowa w Art. 219 Ust. 1 Pkt 2 Ustawy

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:

Nanopolisacharydy i nanopolifenole ze źródeł naturalnych jako wielofunkcyjne zielone materiały polimerowe

Znaczenie moich osiągnięć

Moje badania przyczyniły się do rozwoju zrównoważonej nauki o materiałach i nanotechnologii, w szczególności poprzez postęp w ekstrakcji, funkcjonalizacji i zastosowaniu nanocelulozy i nanoligniny. W tym kontekście wyróżniają się dwa kluczowe osiągnięcia. Drugie osiągnięcie wynikało z pierwszego i są one komplementarne.

Pierwszym jest **opracowanie ekologicznych, wydajnych i skalowalnych metod ekstrakcji i modyfikacji nanocelulozy i nanoligniny z odpadów rolniczych i lignocelulozowych**. Wysiłki te doprowadziły do stworzenia przyjaznych dla środowiska procesów, takich jak łagodna hydroliza kwasem szczawiowym, w celu wytworzenia nanocelulozy o wysokiej krystaliczności i stabilności termicznej [H1-H3]. Metody te unikają niedogodności środowiskowych konwencjonalnej hydrolizy kwasowej, takich jak nadmierna degradacja i zanieczyszczenie, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości materiału. Ponadto udało mi się wyprodukować nanocząstki ligniny (LNP) o ulepszonej stabilności termicznej, właściwościach przeciwutleniających i przeciwbakteryjnych w porównaniu z mikrocząstkami ligniny [H11]. Postępy te zapewniają zrównoważoną platformę do produkcji wysokiej jakości nanomateriałów polimerowych, rozszerzając ich zastosowania w kompozytach, aerożelach i materiałach biomedycznych.

Drugim ważnym osiągnięciem jest **pionierskie wykorzystanie nanocelulozy i ligniny w opracowywaniu zaawansowanych kompozytów i aerożeli o doskonałych parametrach**. Moja praca wykazała wszechstronność i wielofunkcyjność tych materiałów. Obejmuje to integrację nanocelulozy, cząstek ligniny kraft (KLP) i LNP z biodegradowalnymi matrycami polimerowymi, co skutkuje

kompozytami o ulepszonych właściwościach mechanicznych, termicznych i bioaktywnych [H4, H9-H11]. Materiały te rozwiązują ograniczenia konwencjonalnych biopolimerów i zapewniają realne alternatywy dla zastosowań w opakowaniach, urządzeniach biomedycznych i rozwiązaniach środowiskowych. Ponadto opracowałam innowacyjne aerożele na bazie nanocelulozy o dostosowanej porowatości i hydrofobowości do krytycznych zastosowań, takich jak wychwytywanie CO₂ [H5-H6] i absorpcja oleju [H7]. Te aerożele pokazują znaczenie środowiskowe i przydatność materiałów na bazie nanocelulozy w rozwiązywaniu wyzwań, takich jak zanieczyszczenie i emisja gazów cieplarnianych.

Te osiągnięcia podkreślają znaczenie moich badań w promowaniu zrównoważonych innowacji poprzez wykorzystanie zasobów odnawialnych. Na przykład moje badania nad materiałami na bazie nanocelulozy i ligniny wykazały ich potencjał w rozwijaniu zrównoważonych rozwiązań w opakowaniach, poprawiając ich biodegradowalność i zmniejszając zależność od polimerów pochodzących z paliw kopalnych. Ponadto moje prace badają potencjalne zastosowanie tych materiałów w systemach dostarczania leków, koncentrując się na ich zdolności do enkapsulacji i kontrolowanego uwalniania związków bioaktywnych, co wymaga dalszej walidacji eksperymentalnej. Poprzez integrację tych materiałów w nowatorskich zastosowaniach moje badania wpisują się w globalne cele zrównoważonego rozwoju, redukując wpływ na środowisko przy jednoczesnym zwiększaniu wydajności systemów polimerowych. Te osiągnięcia podkreślają praktyczne znaczenie nanocelulozy i ligniny, oferując potencjalne rozwiązania kluczowych wyzwań w zakresie odnawialnych opakowań, remediacji środowiska i zastosowań biomedycznych. Ponadto moje osiągnięcia zawodowe uwydatniają szerszy wpływ mojej pracy, obejmując wysoki wskaźnik cytowań, międzynarodowe uznanie, rolę przywódcze w projektach badawczych oraz mentoring młodych naukowców. Te kamienie milowe świadczą nie tylko o wpływie mojej pracy na społeczność naukową, ale także o moim zaangażowaniu w rozwój wiedzy i wspieranie innowacji w dziedzinie zielonej chemii polimerów. Szczegółowe informacje na temat tych osiągnięć znajdują się w poniższej sekcji i **Załączniku 5**.

4.2. Wykaz opublikowanych prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej i wkładu wnioskodawcy:

Osiągnięciem naukowym jest cykl 11 monotematycznych prac, opublikowanych w latach 2016-2024. W wykazie osiągnięć szczegółowo opisałam swój wkład w powstanie każdej z publikacji. W 5 publikacjach jestem pierwszym autorem lub autorem korespondencyjnym. **Autoprezentacja** nie opisuje w pełni wyników uzyskanych w wymienionych pracach, a jedynie omawia najważniejsze osiągnięcia (sekcja 4.3.). Wszystkie szczegółowe dane opisujące metody syntezy, charakterystykę uzyskanych produktów i potencjalne badania aplikacyjne można znaleźć w załączonych publikacjach (**załącznik 5 i 6**). Prace składające się na niniejszą rozprawę oznaczyłam symbolem H, nadając im numery od 1 do 11.

Wkład wnioskodawcy w wybrany zbiór artykułów został przedstawiony poniżej, a oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu w publikacje zostały przygotowane i przedstawione w **Załączniku 7**. Dla każdego artykułu podaję następujące informacje:

- Aktualny Impact Factor (**IF₂₀₂₄**) czasopisma, w którym opublikowano artykuł na podstawie Journal Citation Report (JCR)
- Impact Factor z roku publikacji artykułu (**IF_{YoP}**)
- 5-letni Impact Factor (IF5years)
- Punkty przyznane czasopismu przez Ministerstwo Edukacji Narodowej (MEiN) zgodnie z najnowszym komunikatem Ministerstwa Edukacji Narodowej z dnia 5 stycznia 2024 r. (<https://www.gov.pl/web/nauka/komunikat-ministra-nauki-z-dnia-05-stycznia-2024-r-w-sprawie-wykazu-czasopism-naukowych-i-recenzowanych-materialow-z-konferencji-miedzynarodowych>)
- Liczba cytowań w momencie przygotowywania wniosku z **WoS** (Web of Science), **S** (Scopus), **GS** (Google Scholar)
- Autorzy korespondencyjni oznaczeni *.

Mój wkład w te badania obejmuje szereg działań, w tym ekstrakcję i produkcję bio-nanocząsteczek, modyfikację chemiczną powierzchni i rozwój metod produkcji zaawansowanych materiałów biopolimerowych na bazie nanocelulozy, ligniny i nanoligniny, a także jako autora korespondencyjnego. Poniższa sekcja szczegółowo opisuje mój wkład w każdy z wybranych artykułów. Raport cytowań przedstawiony w tej sekcji został wyodrębniony z bazy danych na dzień 18 listopada 2024.

[H1] Advances in cellulose nanomaterials

Kargarzadeh*, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J., Lin, N.

Cellulose (2018) 25: 2151-2189

W tej publikacji moje obowiązki i rola obejmowały zainicjowanie pomysłu badawczego, identyfikację luk w badaniach i konceptualizację badania. Opracowałam propozycję i zarys manuskryptu, napisałam większość manuskryptu (z wyjątkiem sekcji napisanych przez moich współautorów) oraz przygotowałam, zrecenzowałam i zredagowałam manuskrypt do przesłania. Ponadto zajmowałam się korespondencją z redaktorem i przygotowywałam odpowiedzi na komentarze recenzentów.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation woS	Citation s	Citation GS	MEiN
4.9	3.57	5.3	326	389	499	100

[H2] Non-cytotoxic, high crystalline and thermal stability derived from a novel agromass of Elettaria cardamomum, using a soft and benign mild oxalic acid hydrolysis

Cherian, R. M., Varghese, R. T., Antony, T., Malhotra, A., Kargarzadeh, H., Chauhan, S. R. Chauhan, A., Chirayil, C. J. Thomas, T.

International Journal of Biological Macromolecule (2023) 253, 126571.

Moje obowiązki w tej publikacji obejmowały udzielanie konsultacji naukowych, kierowanie i doradzanie pierwszemu autorowi w zakresie analizy i interpretacji wyników, przeprowadzanie badań SEM, TGA-DTG i XRD oraz zbieranie danych, przeglądanie i edytowanie wyników sekcji dotyczących dyskusji, a także współnadzorowanie badań.

IF ₂₀₂₄	IF _{Y0P}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
7.7	7.7	7.7	11	12	11	100

[H3] Thermally stable, highly crystalline cellulose nanofibrils isolated from the lignocellulosic biomass of *G. Tiliifolia* plant barks by a facile mild organic acid hydrolysis

Varghese, R. T., Cherian, R. M., Antony, T., Chirayil, C. J., Kargarzadeh, H., Malhotra, A., Chauhan, A., Thomas, S.

Biomass Conversion and Biorefinery (2023), 1-15.

Moje obowiązki w tej publikacji obejmowały udzielanie konsultacji naukowych, kierowanie i doradzanie pierwszemu autorowi w zakresie analizy i interpretacji wyników, przeprowadzanie badań SEM, TGA-DTG i XRD oraz zbieranie danych, przeglądanie i edytowanie wyników oraz sekcji dyskusyjnych, a także współnadzorowanie badań.

IF ₂₀₂₄	IF _{Y0P}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
3.5	4.18	3.6	2	4	3	70

[H4] Starch biocomposite film reinforced by multiscale rice husk fibre

Kargarzadeh, H.*, Johar, N., Ahmad, I.

Composites Science and Technology (2017) 151: 147-155.

Moje obowiązki w ramach tej publikacji obejmowały współtworzenie koncepcji, napisanie oryginalnego projektu i zaproponowanie metodologii ekstrakcji nanocelulozy i produkcji kompozytów.

IF ₂₀₂₄	IF _{Y0P}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
8.3	5.85	8.3	95	115	138	200

[H5] Effect of aminosilane modification on nanocrystalline cellulose properties

Mohd, N. H., Ismail, N. F. H., Zahari, J. I., Wan Fathilah, W. F., Kargarzadeh, H., Ramli, S., Ahmad, I., Yarmo, M. A., Othaman, R.

Journal of Nanomaterials, 2016 (2016), 1-8

Moje obowiązki i rola w ramach tej publikacji obejmowały współtworzenie koncepcji, proponowanie metodologii związanej z produkcją i modyfikacją nanokryształów celulozy, doradzanie studentom w wykonywaniu eksperymentów laboratoryjnych w celu zapewnienia powodzenia ekstrakcji i modyfikacji nanocelulozy oraz recenzowanie i redagowanie manuskryptu.

IF ₂₀₂₄	IF _{Y0P}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
3.7	1.8	3.4	58	52	68	20

[H6] Aminosilanes grafted nanocrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunch aerogel for carbon dioxide capture

Mohd, N. H., Kargazadeh, H., Miyamoto, M., Uemiyac, S., Sharer, N., Baharum, A., Peng, T. L., Ahmad, I., Yarmo, M. A., Othaman, R.

Journal of Materials Research and Technology (2021) 13, 2287-2296.

Miałam podobną odpowiedzialność i rolę w tej publikacji jak w publikacji [H5], ponieważ obie prace powstały w ramach tego samego projektu. Dlatego oświadczam, że moje obowiązki obejmowały współtworzenie koncepcji badania, proponowanie metodologii dotyczącej produkcji i modyfikacji nanokryształów celulozy oraz produkcji aerożelu, mentorowanie studentki podczas przeprowadzania eksperymentów laboratoryjnych w celu zapewnienia pomyślnej ekstrakcji i modyfikacji nanocelulozy oraz przegląd i redakcję manuskryptu. Warto zauważyć, że chociaż manuskrypt został opublikowany w 2021 roku, przygotowanie nanocelulozy, jej modyfikacja i produkcja aerożelu zostały wykonane w czasie, gdy prowadziłam badania podoktorskie na UKM.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
6.2	5.3	6.2	27	28	32	100

[H7] Hydrophobic-oleophilic gamma-irradiated modified cellulose nanocrystal/gelatin aerogel for oil absorption

Rosli, N. A., Khairudin, F. A., Kargarzadeh, H., Othman, R., Ahmad, I.

International Journal of Biological Macromolecules (2022) 219, 213-223.

W tej publikacji byłam współopiekunem studenta, a moje obowiązki obejmowały współtworzenie koncepcji, proponowanie metodologii związanej z produkcją i modyfikacją nanokryształów celulozy, nadzorowanie studenta w laboratorium, sprawdzanie dokładności eksperymentów, a także testy recyklingu, walidację danych, recenzowanie i edycję manuskryptu. Warto zauważyć, że chociaż manuskrypt został opublikowany w 2022 roku, przygotowanie nanocelulozy, jej modyfikacja i produkcja aerożelu zostały wykonane w czasie, gdy prowadziłam badania podoktorskie na UKM.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
7.7	7.7	7.7	18	22	22	100

[H8] Hydrophobic kenaf nanocrystalline cellulose for the binding of curcumin,

Zainuddin, N., Ahmad, I., Kargarzadeh, H., Ramli, S.

Carbohydrate Polymers (2017) 163: 261-269

W tej publikacji moje obowiązki obejmowały zaproponowanie metodologii związanej z produkcją i modyfikacją nanokryształów celulozy w celu zapewnienia skutecznej ekstrakcji i modyfikacji nanocelulozy, nadzorowanie studentów w laboratorium, sprawdzanie eksperymentów i weryfikację danych, przeglądanie i edycję manuskryptu.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
10.7	6.044	10.2	93	102	122	140

[H9] Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers, thermoplastic polymers, and porous nanocomposites

Kargarzadeh, H.* Huang, J., Lin, N. Ahmad, I., Mariano, M., Dufresne, A., Thomas, S., Galeski, A. Progress in Polymer Science (2018) 87: 197-227.

W tej publikacji moje obowiązki obejmowały zainicjowanie pomysłu badawczego, identyfikację luk w badaniach i konceptualizację badania. Zaproponowałam zarys manuskryptu, napisałam większość manuskryptu (poza sekcjami, których autorami byli moi współautorzy) oraz przygotowałam, zrecenzowałam i zredagowałam manuskrypt do druku. Ponadto zajmowałam się korespondencją z redaktorem i przygotowywałam odpowiedzi na komentarze recenzentów.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
26	15.622	29.5	324	387	453	200

[H10] PBAT green composites: effects of kraft lignin particles on the morphological, thermal, crystalline, macro and micromechanical properties

Kargarzadeh, H.*, A. Galeski, A. Pawlak
Polymer (2020) 203, 122748.

W tej publikacji moje obowiązki obejmowały współkonceptualizację, prowadzenie wszystkich prac eksperymentalnych, zbieranie i analizę danych oraz pisanie oryginalnego szkicu manuskryptu. Ponadto zajmowałam się korespondencją z redaktorem i przygotowywałam odpowiedzi na komentarze recenzentów.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
4.1	3.6	3.9	88	92	105	100

[H11] Exploring the potential of lignin nanoparticles in enhancing the mechanical, thermal, and bioactive properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)

Kargarzadeh, H.*, Kobylinska, A., Antos-Bielska, M., Krzyzowska, M., Galeski, A.
International Journal of Biological Macromolecules (2024) 262, 129880.

W tej publikacji moje obowiązki obejmowały konceptualizację, przeprowadzenie wszystkich prac eksperymentalnych z wyjątkiem testu aktywności antyoksydacyjnej, testów przeciwdrobnoustrojowych i przeciwwirusowych, zbieranie danych i analizę danych oraz napisanie oryginalnego manuskryptu. Ponadto zajmowałam się korespondencją z redaktorem i przygotowywałam odpowiedzi na komentarze recenzentów.

IF ₂₀₂₄	IF _{YoP}	IF _{5years}	Citation _{WoS}	Citation _s	Citation _{GS}	MEiN
7.7	7.7	7.7	4	4	4	100

Dane scjentometryczne dotyczące publikacji H1-H11:

Wskaźnik	Wartości (18.11.2024)
Łączny współczynnik wpływu:	$IF_{2024} = 90.5$, $IF_{YOP} = 69.064$, $IF_{5years} = 93.5$
Średni współczynnik wpływu:	$IF_{2024} = 8.23$, $IF_{YOP} = 6.27$, $IF_{5years} = 8.5$
Łączna liczba punktów MEiN	1230
Całkowita liczba cytowań:	1045 (WoS) / 1207 (S) / 1457 (GS)

4.3. Przedstawienie celu naukowego opublikowanych prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej oraz uzyskanych wyników z omówieniem ich potencjalnego zastosowania.

Przegląd cyklu wydawniczego

W tej sekcji przedstawiono przegląd publikacji włączonych do cyklu, które stanowią podstawę rozprawy habilitacyjnej. Głównym osiągnięciem jest wykazanie, że można precyzyjnie projektować i rozwijać wielofunkcyjne, zielone materiały polimerowe, wykorzystując nanopolisacharydy i nanopolifenole pochodzące z zasobów naturalnych. Materiały te umożliwiają tworzenie zaawansowanych systemów opartych na polimerach, takich jak kompozyty i aerożele, o zwiększonej wydajności i zrównoważonym rozwoju. Dostrajalne cechy w finalnych nanocząstkach, kompozytach i materiałach aerożelowych obejmują:

- Nanocelulozę o dużej powierzchni właściwej i wysokim stosunku kształtu, nietoksyczności, wysokiej krystaliczności oraz doskonałej stabilności termicznej, wytwarzaną w sposób przyjazny dla środowiska przy zoptymalizowanym uzysku i czystości [H1- H3].
- Nanoligninę o wysokim stosunku kształtu, nietoksyczności oraz właściwościach antyoksydacyjnych, antybakteryjnych i przeciwwirusowych, co poszerza jej funkcjonalne zastosowania [H11].
- Biodegradowalne kompozyty i nanokompozyty o lepszych właściwościach mechanicznych i termicznych, zwiększonej odporności na wodę oraz właściwościach bioaktywnych, odpowiednie do zrównoważonych zastosowań materiałowych [H4, H9 - H11].
- Zmodyfikowaną nanocelulozę, która jest bardziej hydrofobowa niż natywna nanoceluloza i wysoko funkcjonalizowana, dzięki czemu nadaje się do zastosowań wymagających wysokiej wydajności, takich jak adsorpcja CO₂ i dostarczanie leków [H5, H8, H9].
- Biodegradowalne zmodyfikowane aerogeły nanocelulozowe o wysokiej porowatości, dużej powierzchni właściwej, równomiernym rozkładzie wielkości porów oraz ulepszonych właściwościach sorpcyjnych CO₂ [H6, H9].
- Aerogeły nanocelulozowo-żelatynowe o jednolitych rozmiarach porów, zwiększonej wytrzymałości na ściskanie i ulepszonej zdolności absorpcji oleju. Aerogeły te wykazują doskonałą możliwość wielokrotnego użycia, zachowując 96% swojej zdolności absorpcyjnej po ośmiu cyklach [H8, H9].

Jednym z istotnych aspektów przedstawionych badań są przyjazne dla środowiska i skalowalne metody wytwarzania zarówno nanopoliesacharydów, jak i nanopolifenoli oraz z ich udziałem, odpowiednich materiałów polimerowych, co zapewnia powtarzalność i spójność między seriami eksperymentalnymi. Techniki te zmniejszają niejednorodność właściwości materiałów, co ma szczególne znaczenie w ich zastosowaniach w medycynie, ochronie środowiska i przemyśle. W tych eksperymentach kluczowe jest kontrolowanie i utrzymanie wielkości, funkcjonalności chemicznej oraz właściwości fizykochemicznych nanocząstek, aby stworzyć solidną platformę do rozwoju zaawansowanych i ekologicznych systemów polimerowych. Materiały biooparte nie tylko dostarczają rozwiązań dla globalnych problemów zrównoważonego rozwoju, ale także otwierają nowe możliwości w zakresie kompozytów, aerogeli, oczyszczania wody, dostarczania leków oraz aktywnego pakowania, co sprzyja rozwojowi zielonej nanotechnologii i nauki o materiałach w przyszłości.

Wstęp

Lignoceluloza to złożony związek występujący w ścianach komórkowych roślin, składający się z trzech głównych składników: celulozy, ligniny i hemicelulozy. Celuloza występuje głównie w ścianach komórkowych włókien roślinnych. Dzięki swojej krystalicznej strukturze zapewnia włóknom wytrzymałość mechaniczną, a jej hydrofilowość powoduje absorpcję i retencję wody, co wpływa na pęcznienie włókna oraz jego właściwości mechaniczne. Hemiceluloza otacza mikrowłókna celulozy w amorficznych obszarach ścian komórkowych roślin, działa jako matryca, wiążąc się z celulozą i nadając włóknom elastyczność. Lignina występuje w przestrzeniach między mikrowłóknami celulozy w ścianach komórkowych roślin, wypełniając szczeliny i działając jako spoiwo, zwiększając sztywność i wytrzymałość oraz chroniąc przed rozkładem mikrobiologicznym. Te składniki razem tworzą strukturalny szkielet ścian komórkowych roślin.

Biomasa lignocelulozowa jest strategicznym, odnawialnym zasobem naturalnym, generowanym przez różne sektory działalności człowieka, takie jak rolnictwo i leśnictwo, a także odpady organiczne ze stacji recyklingowych, przemysłu papierniczego, drzewnego i celulozowego. Wraz z zaangażowaniem społeczności globalnej w wyzwania środowiskowe i poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań, lignoceluloza zyskała znaczną uwagę ze względu na swój potencjał do ograniczenia wpływu na środowisko, pełnienia roli odnawialnego źródła energii i służenia jako wszechstronny surowiec do produkcji materiałów o wysokiej wartości.

Roczna globalna produkcja biomasy lignocelulozowej wynosi około 181,5 miliarda ton, z czego jedynie 8,2 miliarda ton znajduje zastosowanie w różnych obszarach, podczas gdy reszta pozostaje niewykorzystana w przyrodzie. Wzrost zainteresowania biomasą lignocelulozową i jej przetwarzaniem na produkty o wysokiej wartości w ostatnich dekadach był wynikiem połączenia troski o środowisko, czynników ekonomicznych i technologicznych, wspieranych przez polityki i trendy rynkowe. Celuloza i lignina, dwa główne składniki biomasy lignocelulozowej, zyskały szczególne zainteresowanie w

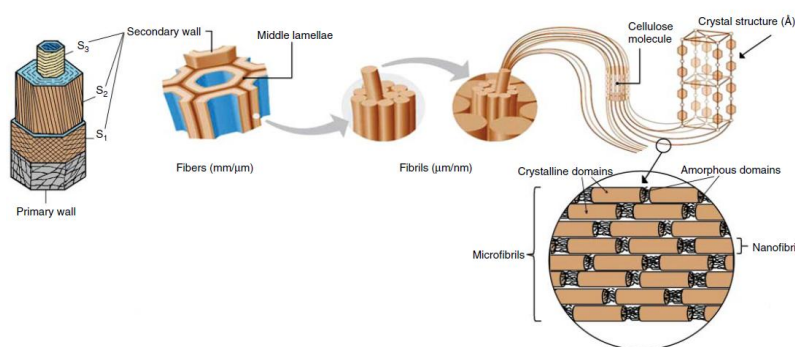
badaniach nad zrównoważonymi materiałami i bioenergią w ostatnich dekadach. Nanotechnologia i badania nad celulozą i ligniną są coraz bardziej powiązane, ponieważ naukowcy badają innowacyjne sposoby odkrywania unikalnych właściwości tych biopolimerów na poziomie nanometrycznym.

Podczas studiów doktoranckich moja praca badawcza koncentrowała się na ekstrakcji, modyfikacji i zastosowaniu celulozy oraz nanocelulozy z biomasy lignocelulozowej. Chociaż początkowo skupiałem się na ich konwencjonalnym zastosowaniu, rozpoczęłam interesować się ich potencjalnymi zastosowaniami w dziedzinach takich jak dostarczanie leków i oczyszczanie powietrza. Ta ciekawość skłoniła mnie do zgłębienia właściwości i potencjalnych zastosowań tych materiałów. Ponadto, rozpoczęłam badania nad drugim głównym składnikiem biomasy lignocelulozowej: ligniną i nanocząstkami ligniny.

Wyniki badań, przeprowadzonych w latach **2016-2024**, zostały opisane w serii artykułów [H1-H11], stanowiących osiągnięcie naukowe, które jest podstawą niniejszego wniosku habilitacyjnego. Na początku zostanie przedstawione krótkie wprowadzenie do celulozy i ligniny, podstawowych składników materiałów lignocelulozowych, a następnie wyjaśnienie celów naukowych wybranych publikacji i osiągnięć naukowych.

Celuloza i Nanoceluloza

Celuloza jest najpowszechniejszym rodzajem odnawialnej materii organicznej na Ziemi, której roczna produkcja biosyntetyczna szacowana jest na ponad 10^{11} ton. Jest to półkryształiczny polisacharyd składający się z liniowych łańcuchów cząsteczek glukozy, co nadaje jej wytrzymałość strukturalną i sztywność. Dzięki swojej biokompatybilności, biodegradowalności oraz odnawialnemu charakterowi, celuloza znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle tekstylnym, papierniczym i farmaceutycznym. Głównym naturalnym źródłem celulozy są włókna roślinne. Unikalna hierarchiczna architektura naturalnych włókien, składająca się z mikro- i nanowłókien oraz kryształitów celulozowych, umożliwia ekstrakcję mikro- i nanoskładników (Rysunek 1).

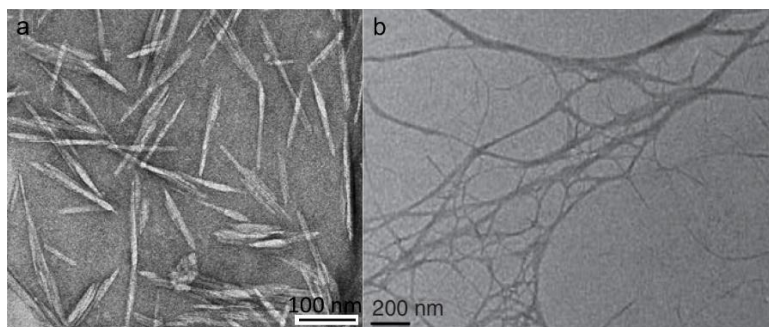


Rysunek 1. Model ściany komórkowej włókna celulozowego: Warstwy S₁, S₂ i S₃ to wtórne warstwy ściany komórkowej; układ fibryli, mikrofibryle i celuloza w ścianie komórkowej rośliny; schematyczna organizacja domen krystalicznych i amorficznych we włóknie celulozowym, , rysunek z Ref. [1]

Celuloza jest półkryształicznym polisacharydem złożonym z jednostek anhydroglukozowych (AGU), połączonych wiązaniami β -1,4-glikozydowymi. Dwie powtarzające się jednostki AGU przyjmują konformację „krzesła”, która obejmuje także system numeracji atomów węgla. Każda jednostka zawiera trzy grupy funkcyjne hydroksylowe: jedną pierwotną i dwie wtórne. Dzięki pozycji ekwatorialnej grup hydroksylowych AGU może tworzyć wewnętrzne wiązania wodorowe, na przykład pomiędzy atomem wodoru grupy hydroksylowej C-3 jednej jednostki a atomem tlenu pierścienia sąsiedniej jednostki. Te wewnętrzne wiązania wodorowe ograniczają swobodę rotacji pierścieni glukopiranozowych wokół wiązań glikozydowych, co przyczynia się do zwiększenia sztywności łańcuchów celulozowych. Silny system wewnątrz- i międzycząsteczkowych wiązań wodorowych w kryształitach sprawia, że są one wysoce uporządkowanymi, sztywnymi i mocnymi składnikami celulozy, odpornymi na działanie wody i niektórych odczynników chemicznych. Z drugiej strony, bardzo słabe wiązania wodorowe w niekryształicznych, amorficznych domenach przyczyniają się do zwiększenia hydrofilowości i dostępności materiałów celulozowych [1].

Nanoceluloza jest pochodną celulozy i jest nową generacją nanomateriałów, składającą się z nanorozmiarowej celulozy, która wykazuje wyjątkową wytrzymałość, lekkość i dużą powierzchnię. Jest biodegradowalna, nietoksyczna i zrównoważona, co czyni ją idealnym kandydatem do ekologicznych zastosowań. W przeciwieństwie do nieorganicznych nanocząsteczek, które mogą stwarzać ryzyko ze względu na swoją niebiodegradowalność i potencjalną cytotoksyczność, nanoceluloza jest bezpieczna do zastosowań biologicznych i środowiskowych. Ponadto jej produkcja jest coraz bardziej opłacalna ze względu na obfitość surowców i postęp w metodach przetwarzania, zapewniając wyraźną przewagę nad często kosztowną i zasobochłonną produkcją innych nanocząsteczek.

Nanoceluloza jest zazwyczaj dzielona na dwie główne grupy w zależności od technik jej przygotowania: nanokryształy celulozowe (CNC) oraz nanowłókna celulozowe (CNF). CNC można uzyskać poprzez hydrolizę kwasową, najczęściej przy użyciu kwasu siarkowego, co prowadzi do wytworzenia sulfonowanych CNC. Z kolei produkcja CNF zazwyczaj wymaga chemicznej obróbki wstępnej przed mechanicznym rozdrabnianiem, takimi metodami jak homogenizacja, mikrofluidyzacja i supermielenie. Wymiary geometryczne oraz ostateczne właściwości CNC i CNF bezpośrednio zależą od źródła celulozy, warunków przygotowania i przetwarzania oraz ewentualnych przed- lub obróbek wtórnych. CNC mają zazwyczaj średnicę rzędu kilku nanometrów i długość od 10 do 500 nm, podczas gdy CNF mają średnicę od 3 do 50 nm i długość kilku mikrometrów. Ostateczne właściwości chemiczne i fizyczne nanocelulozy zależą bezpośrednio od źródła i warunków przygotowania celulozy. Ze względu na różnice w właściwościach, CNC i CNF znajdują zastosowanie w różnych aplikacjach. Obszerne badanie dotyczące produkcji, modyfikacji powierzchniowej i właściwości celulozy oraz nanocelulozy zostało przedstawione w dwóch moich publikacjach: artykule przeglądowym [2] oraz podręczniku [1], który nie jest częścią osiągnięcia habilitacyjnego. Rysunek 2 przedstawia rysunki CNC i CNF z transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM).

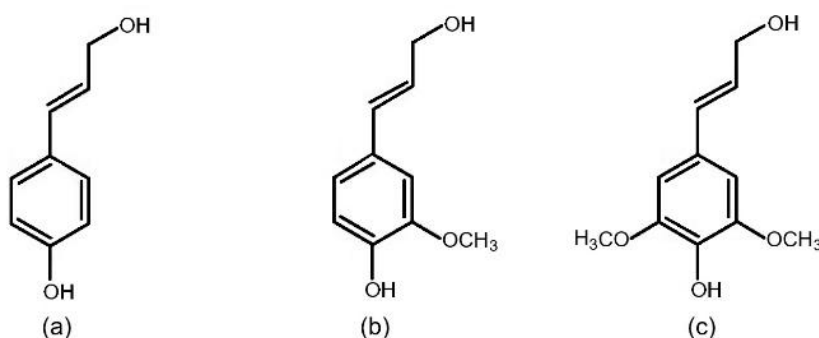


Rysunek 2. Obrazy TEM a) nanokryształów celulozowych (CNC) oraz nanowłókien celulozowych (CNF) [1]

Lignina i nanolignina

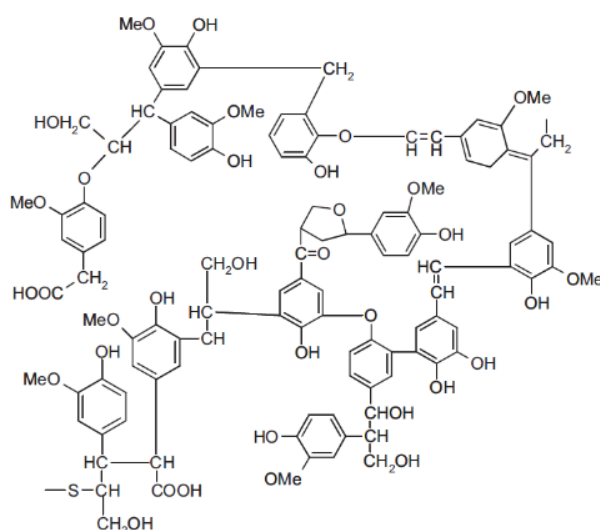
Lignina jest drugim pod względem obfitości naturalnym polimerem po celulozie i, jak wspomniano wcześniej, znajduje się głównie w ścianie komórkowej włókien roślinnych. Główne źródło ligniny dostępne na większą skalę pochodzi z zużytych roztworów gotujących oraz chemicznej separacji włókien drzewnych w przemyśle papierniczym i celulozowym. Globalna produkcja materiałów i chemikaliów opartych na ligninie przekracza 50 milionów ton rocznie. Lignina nie została jeszcze przekształcona w wysokowartościowe produkty na dużą skalę i obecnie jest głównie wykorzystywana do odzyskiwania energii w zakładach celulozowych. Ogromne możliwości zabezpieczenia dużych ilości tego surowca po korzystnych ekonomicznie cenach oferuje przemysł papierniczy. Tradycyjnie lignina nie była ceniona przez ludzi; jest produktem ubocznym przy wytwarzaniu wysokiej jakości papieru. W Europie w procesach celulozowych gromadzi się około 17 milionów ton niechcianej ligniny rocznie. Większość jest spalana, a około 2% jest wykorzystywane do innych, niskowartościowych celów komercyjnych.

Lignina jest złożona z silnie rozgałęzionych i amorficznych bio-makro-molekuł o zmiennym składzie, zależnym od źródła roślinnego. Jest unikalnym biopolimerem ze względu na swoją heterogeniczność, obecność grup aromatycznych oraz brak zdefiniowanej struktury pierwotnej. Jednakże lignina może być postrzegana jako spolimeryzowany produkt trzech podstawowych monomerów fenylopropanowych, które stanowią powtarzalne jednostki, znane łącznie jako "monolignole": alkohol p-kumarylowy, alkohol koniferylowy i alkohol sinapylowy (Rysunek 3).



Rysunek 3. Bloki budulcowe ligniny: a) alkohol p-kumarylowy, b) alkohol koniferylowy oraz c) alkohol sinapylowy

Te trzy monolignole stanowią większość powtarzalnych jednostek tworzących cząsteczki polimeru ligninowego; jednakże w mniejszych ilościach mogą występować także inne lignole. Proporcja różnych monomerów w ligninie znacznie się różni w zależności od rodzaju materiału roślinnego, a także istnieje wiele możliwych wzorców połączeń między poszczególnymi jednostkami, co dodaje dodatkowej złożoności do końcowej cząsteczki. Przedstawienie fragmentu molekularnego ligniny kraft, najczęściej występującej ligniny technicznej, ilustrujące różne ważne połączenia, pokazano na [Rysunku 4](#). Dzięki swojej unikalnej strukturze fenolowej, oprócz biodegradowalności, lignina ma także inne specjalne właściwości, takie jak odporność na promieniowanie UV, działanie przeciwutleniające oraz właściwości przeciwbakteryjne i przeciwwirusowe.



Rysunek 4. Model strukturalny fragmentu ligniny technicznej (lignina kraft) przedstawiający przykłady ważnych połączeń wewnątrzcząsteczkowych [3].

Zawartość najważniejszych grup funkcyjnych obecnych w materiałach ligninowych, takich jak grupy hydroksylowe, fenolowe, karboksylowe i sulfonowe, różni się w zależności od zastosowanego procesu pulpingowego. Lignina kraft jest zwykle izolowana przez wytrącanie, które pozostaje po gotowaniu w wyniku zakwaszenia i protonacji grup fenolowych. W zależności od wartości pH, do której jest zakwaszany odpadowy roztwór (czarny roztwór), uzyskuje się różny skład i wydajność ligniny. Hydrorozpuszczalna forma ligniny, zawierająca dużą liczbę grup ładunkowych, lignosulfonaty, jest wytwarzana z produktów ubocznych procesu pulpingowego sulfitowego, w którym ligniny są sulfonowane, degradowane i rozpuszczane. Proces organosolwny (ang. organosolv) to proces pulpingowy wykorzystujący organiczne rozpuszczalniki wodne, w którym lignocelulozowa biomasa oddziela fragment ligniny poprzez solubilizację. Homogeniczność ligniny przetworzonej organosolwnie jest wyższa niż w przypadku lignin kraftowych i lignosulfonatów. Średnia masa cząsteczkowa polimerów lignosulfonatów zazwyczaj wynosi od 5 do 400 kDa w porównaniu do 1-5 kDa dla ligniny kraft oraz 0.5-3 kDa dla ligniny organosolwnej. Rozkład mas cząsteczkowych dla lignosulfonatów i ligniny kraft jest wysoki w porównaniu do ligniny organosolwnej. Lignosulfonaty

rozpuszczalne w wodzie są obecnie najczęściej stosowanymi rodzajami technicznych polimerów ligninowych i wykorzystywane są w wielu zastosowaniach o niskiej wartości.

Nanolignina, nanoskalowy odpowiednik ligniny, oferuje jeszcze większy potencjał aplikacyjny ze względu na zwiększoną powierzchnię i reaktywność, co czyni ją obiecującym kandydatem do zastosowań w naukach materiałowych i kompozytach polimerowych [4]. W 2012 roku po raz pierwszy wytworzono nanocząstki ligniny z ligniny poprzez wytrącanie kwasowe [5]. Od tego czasu zaproponowano wiele różnych technik produkcji nanoligniny z różnych typów ligniny, takich jak metoda wymiany rozpuszczalnika/wytrącania, wytrącanie przeciwwapienne, samoułożenie, odparowanie rozpuszczalnika w emulsji, ultradźwiękowanie, suszenie rozpylaniem itp [6, 7].

Pomimo obiecujących cech ligniny i nanoligniny oraz ich dużej produkcji, wciąż istnieje znaczna luka badawcza w zakresie zrozumienia i wykorzystania pełnych możliwości ligniny i nanoligniny w zaawansowanych materiałach. Rozwój kompozytów opartych na ligninie i nanoligninie jest wciąż w początkowej fazie, z wieloma kwestiami do zbadania, dotyczącymi ich właściwości mechanicznych, termicznych i barierowych. Moje badania mają na celu wypełnienie tej luki i przyczynienie się do stworzenia zrównoważonych, wysokowydajnych materiałów, które odpowiadają rosnącemu zapotrzebowaniu na ekologiczne rozwiązania w przemyśle. Poprzez innowacyjne techniki przetwarzania i modyfikacje powierzchniowe, potencjał ligniny i nanoligniny do zrewolucjonizowania nauki o materiałach pozostaje w dużej mierze niewykorzystany, oferując obiecującą ścieżkę naprzód w rozwoju zielonych kompozytów.

Moje osiągnięcia związane z cyklem **11 publikacji** są wyjaśnione poniżej, zarówno dla biomateriałów opartych na nanocelulozie, jak i ligninie oraz nanoligninie.

Ekstrakcja nanocelulozy z naturalnych źródeł biomasy była znaczącym obszarem badań przez ostatnie dwie dekady. Trwające badania mają na celu produkcję nanocelulozy o wysokiej wydajności przy użyciu przyjaznych dla środowiska i zrównoważonych metod. Odkrywanie nowych źródeł lignocelulozy oraz optymalizacja metod ekstrakcji są kluczowe, ponieważ parametry reakcji ekstrakcji mają duży wpływ na wydajność i czystość nanocelulozy, a także na jej grupy reaktywne i funkcjonalne. Czasami techniki ekstrakcji muszą być dostosowane do konkretnej końcowej aplikacji nanocelulozy. Chociaż do 2016 roku opublikowano kilka prac dotyczących nanocelulozy, koncentrując się jedynie na powszechnych technikach przygotowawczych, wiele nowatorskich technik i ostatnich osiągnięć nie zostało odpowiednio omówionych, w tym i) pewne techniki produkcji CNF (np. ekstruzja i kolizja wodna) oraz produkcji CNC (np. stała i gazowa hydroliza kwasowa), ii) metody modyfikacji fizycznej nanocelulozy, takie jak obróbka plazmowa i promieniowanie, oraz iii) ocena cyklu życia (LCA) nanocelulozy. Dlatego ta praca miała na celu kompleksowy przegląd wielu nanoceluloz, z szczególnym uwzględnieniem ostatnich osiągnięć w produkcji, charakteryzacji i modyfikacji CNC i CNF, a także LCA nanocelulozy. Ten przegląd przyciągnął znaczną uwagę czytelników, co potwierdza wysoka

liczba cytowań (503 w GS w grudniu 2024). W oparciu o zgromadzoną wiedzę i informacje w tym w artykule [H1] zaproponowałam i wprowadziłam nową klasyfikację różnych typów nanocelulozy według ich technik ekstrakcji na podstawie danych literaturowych i naszych własnych badań. Artykuł omówił i wypełnił lukę badawczą w tej dziedzinie, a [H1] zawierał między innymi opis:

- Klasyfikacja i opis dwóch głównych typów nanocelulozy: kryształów nanocelulozy (CNC) oraz nanowłókien celulozowych (CNF)
- Wprowadzenie i porównanie różnych technik produkcji CNC, zalet i wad
- Wprowadzenie i porównanie różnych metod przygotowania CNF oraz wykorzystywanego sprzętu, zalet i wad
- Wskazanie głównych trudności związanych z mechaniczną defibrylacją oraz koniecznością odpowiedniego wstępnego przygotowania
- Opis różnych możliwych procedur chemicznej i fizycznej modyfikacji powierzchni zarówno CNC, jak i CNF
- Ocena cyklu życia (LCA) nanocelulozy (ta część była wyjątkowa, ponieważ była pierwszym opisem problemów dotyczących LCA nanocelulozy)
- Zaproponowano i sklasyfikowano kryteria determinujące wysoką efektywność ekstrakcji nanocelulozy oraz wskazano odpowiednie techniki wstępnego przygotowania do produkcji CNC i NFC.

Wyraźnie wykazano, że mechaniczna ekstrakcja nanocelulozy jest bardziej przyjazna dla środowiska i zużywa mniej energii w porównaniu do metod chemicznych, prowadząc głównie do produkcji NFC. Wydajność NFC zależy od kroków wstępnego przygotowania, liczby cykli defibrylacji i innych czynników związanych z maszynami wykorzystywanymi do ekstrakcji. W przeciwieństwie do tego, podczas chemicznej ekstrakcji nanocelulozy, która prowadziła do uzyskania CNC, kluczowe znaczenie mają takie czynniki jak czas reakcji, temperatura, stosunek celulozy do roztworu oraz stężenia kwasów, które decydują o wydajności, stosunku wymiarów i czystości nanocelulozy.

Po dokładnym przeglądzie literatury zidentyfikowałam, że wybór metody wstępnej obróbki w dużej mierze zależy od źródła celulozy, a w mniejszym stopniu od pożądanej początkowej morfologii celulozy przeznaczonej do dalszej obróbki. Podkreśliłam również znaczenie odpowiedniej obróbki wstępnej, która zwiększa dostępność włókien, powiększa ich wewnętrzną powierzchnię, modyfikuje krystaliczność, rozbija wiązania wodorowe oraz zwiększa reaktywność celulozy. Usprawnienia te nie tylko obniżają zapotrzebowanie na energię, ale także optymalizują proces produkcji nanocelulozy.

W mojej analizie sklasyfikowałam szeroką gamę metod wstępnej obróbki pod kątem ich przydatności do ekstrakcji nanokryształów celulozy (CNC) oraz nanowłókien celulozowych (CNF). Do tych metod zalicza się procesy roztwarzania, bielenia i obróbki alkalicznej, obróbkę enzymatyczną, utlenianie, karboksymetylację i acetylację włókien, a także techniki mechaniczne, takie jak homogenizacja,

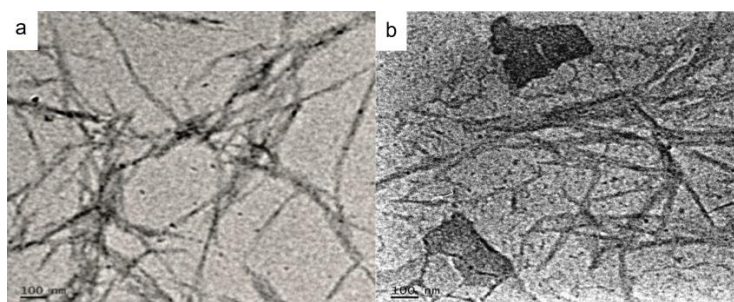
rafinacja, mielenie i kriożgniatanie. Procesy te są kluczowe w projektowaniu ekonomicznych i przyjaznych środowisku dróg produkcji nanocelulozy. Dodatkowo, przeanalizowałam różne metody chemicznej i fizycznej modyfikacji powierzchni, które wprowadzają grupy funkcyjne do nanocelulozy, poprawiając jej właściwości hydrofobowe lub hydrofilowe w zależności od wymagań aplikacyjnych. Modyfikacje te poszerzają możliwości zastosowania nanocelulozy w wielu sektorach przemysłowych.

Systematyzując wiedzę na temat wpływu źródła celulozy, metod ekstrakcji, obróbki wstępnej oraz modyfikacji powierzchni, przyczyniłam się do opracowania nowych koncepcji dotyczących ekologicznych metod pozyskiwania i wysokowydajnej produkcji nanocelulozy. Moja praca dostarcza również podstaw do poprawnej interpretacji wyników eksperymentalnych podczas dalszych badań. Niniejszy przegląd stał się fundamentem do przygotowania rozdziału w książce *Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites*, wydanej przez Wiley, której byłam współredaktorką wraz z prof. Ishakiem Ahmadem (moim byłym promotorem), prof. Alainem Dufresne (moim byłym współpromotorem) oraz prof. Sabu Thomasem (Mahatma Gandhi University). [1].

Do tej pory zaproponowano i zastosowano różne metody ekstrakcji nanocelulozy z naturalnych włókien i odpadów rolniczych. Proces ten często rozpoczyna się od obróbki wstępnej, takiej jak merceryzacja (obróbka alkaliczna), w celu usunięcia hemicelulozy i ligniny, a następnie wybielania przy użyciu takich środków jak chloryn sodu, podchloryn sodu, nadtlenek wodoru lub ozon. Spośród nich metoda chlorynowa jest najczęściej stosowana ze względu na skuteczną delignifikację [8, 9]. Po obróbce wstępnej do produkcji nanocelulozy wykorzystuje się hydrolizę kwasową, defibrylację mechaniczną lub metody chemiczno-mechaniczne [H1, 9].

Chociaż kwasy mineralne, takie jak H_2SO_4 i HCl , są powszechnie używane do hydrolizy celulozy, mają one znaczące wady, w tym nadmierną degradację celulozy, korozję sprzętu oraz poważne zanieczyszczenie środowiska [10]. Problemy te doprowadziły do opracowania metod hydrolizy z użyciem kwasów organicznych, które oferują takie korzyści jak niższa kwasowość, zredukowana korozja, wprowadzenie grup funkcyjnych oraz łatwiejsze odzyskiwanie przez rekrytalizację. Do ekstrakcji nanowłókien celulozowych (CNF) lub nanokryształów celulozy (CNC) badano kwasy organiczne, takie jak kwas szczawiowy, maleinowy i cytrynowy. Jednak metody te często prowadziły do uzyskania CNF zamiast CNC ze względu na niższą skuteczność w rozrywaniu łańcuchów celulozy [11, 12]. W odpowiedzi na te wyzwania opracowano nowatorską, ekologiczną metodologię ekstrakcji CNC we współpracy z moimi współautorami, co przedstawiono w artykułach [H2] i [H3]. Po raz pierwszy CNC wyizolowano z dwóch nowych źródeł celulozy: odrzuconych łodyg *Elettaria cardamomum* (EC) oraz kory rośliny *Grewia Tiliifolia* (GT). Proces ten przeprowadzono przy użyciu metody chemiczno-mechanicznej, łączącej łagodną hydrolizę kwasem szczawiowym ($H_2C_2O_4$) z eksplozją parową i homogenizacją. Proces ten, poprzedzony obróbką wstępną z użyciem $NaOH$ i $NaClO_2$, podkreśla potencjał „zielonych metod ekstrakcji”, które eliminują wady kwasów mineralnych, jednocześnie zapewniając wysoką krystaliczność oraz zrównoważenie środowiskowe.

Wpływ chemicznej obróbki wstępnej i hydrolizy kwasem szczawiowym na właściwości fizykochemiczne i biologiczne włókien, a także wydajność ekstrakcji, został dokładnie zbadany w tych artykułach [H2, H3]. Zaobserwowano, że chemiczna obróbka wstępna skutecznie usuwała zanieczyszczenia, hemicelulozę i ligninę, powodując znaczące zmiany w rozmiarze włókien, krystaliczności i stabilności termicznej zarówno włókien EC, jak i GT oraz uzyskanej nanocelulozy. Po zakończeniu obróbki rozmiar włókien został zredukowany z mikroskali do nanoskali, co ilustrują obrazy TEM przedstawione na Rysunku 5, ukazujące formowanie się indywidualnych pręcikowych struktur nanocelulozy.



Rysunek 5. Obraz TEM a) nanocelulozy EC [H2] i b) nanocelulozy GT [H3].

W wyniku przeprowadzonego badania porównawczego stwierdziłam, że średnie wartości długości, średnicy i stosunku kształtu nanocelulozy pochodzącej z EC [H2] są znacząco większe niż wartości uzyskane dla nanocelulozy otrzymanej z różnych biomateriałów rolniczych w procesie hydrolizy kwasami mineralnymi. Te wartości są również wyższe w porównaniu z nanocelulozą uzyskaną w wyniku hydrolizy za pomocą kwasu cytrynowego/HCl [13]. Dodatkowo stwierdziłam, że mimo identycznych warunków hydrolizy dla obu surowych włókien, ich rozmiar po każdym etapie obróbki, a także po hydrolizie, różnił się znacząco. Wskazuje to, że źródło celulozy jest czynnikiem decydującym o uzyskaniu konkretnego rozmiaru i stosunku wymiarów nanocelulozy, oprócz warunków hydrolizy kwasowej i reakcji wstępnego traktowania. Oba artykuły omawiają również mechanizm ekstrakcji włókien celulozowych oraz reakcje chemiczne i etapy związane z usuwaniem zanieczyszczeń, hemicelulozy i ligniny. Oprócz rozmiaru średnicy włókien, krystaliczność i rozmiar kryształów włókien celulozowych również wzrosły po każdym etapie traktowania chemicznego i osiągnęły maksimum po hydrolizie kwasowej. Indeks krystaliczności wynoszący odpowiednio 81% i 78% nanocelulozy wydobytej z EC i GT jest znacząco wyższy w porównaniu do innych podobnych raportowanych CNC pochodzących z agro-masy przy użyciu hydrolizy kwasami organicznymi lub mineralnymi. Wzrost rozmiaru kryształów wskazuje na samoorganizację różnych monokryształów celulozy w celu utworzenia wysoko uporządkowanej, gęsto upakowanej struktury poprzez zwiększone tworzenie wiązań wodorowych między nimi, co również wspiera wzrost indeksu krystaliczności próbki na każdym etapie, a tym samym zapewnia wysoką zwartą strukturę.

Dodatkowo, stabilność termiczna włókien wzrosła po traktowaniu chemicznym. Natomiast stabilność termiczna nanocelulozy była niższa w porównaniu do włókien alkalicznych i bielonych z powodu obecności reszt kwasowych na CNC oraz grup karboksylowych, które działają jako aktywne miejsca i przyczyniają się do niższej stabilności termicznej CNC. Ponadto, zwiększenie powierzchni wskutek mniejszego rozmiaru cząstek CNC poprawiło szybkość przewodzenia ciepła, co może być przyczyną niższej stabilności termicznej nanocelulozy. Temperatura degradacji nanocelulozy EC i GT wynosiła odpowiednio około 339°C i 344°C, co jest znacznie wyższe w porównaniu do innych nanoceluloz uzyskanych z hydrolizy kwasami mineralnymi. To odkrycie sugeruje, że zarówno nanoceluloza EC, jak i GT mogą być dobrymi kandydatami w dziedzinie przetwarzania termicznego, takiego jak ekstruzja wysokotemperaturowa.

Aby zbadać stabilność koloidalną uzyskanej CNC, przeprowadzono pomiar potencjału zeta dla homogenizowanej nanocelulozy zawieszonej w wodzie. Zwykle aglomeracja nanocelulozy występuje, jeśli wartość potencjału zeta mieści się w zakresie -15 do 15 mV [14]. Średni potencjał zeta nanocelulozy EC i GT wynosi odpowiednio -34.244 mV i -21.9 mV, co potwierdziło ich wysoką stabilność w wodzie. Ładunek powierzchniowy wzrasta wraz ze wzrostem czasu hydrolizy, co prowadzi do zwiększenia stabilności koloidalnej CNC [9].

W celu sprawdzenia nietoksyczności otrzymanej nanocelulozy uzyskanej w wyniku hydrolizy kwasem szczawiowym, nanocelulozę EC poddano testom z wykorzystaniem szczepów *K. pneumonia*, *E. coli*, *S. aureus* oraz *S. epidermidis* [H2]. Zaobserwowano, że nanoceluloza nie wykazuje działania hamującego wobec wspomnianych bakterii. Dodatkowo nie zaobserwowano żadnych zmian we wzroście bakterii. Zawiesiny nanocelulozy EC nie wykazują żadnej cytotoksyczności bakteryjnej i, w związku z tym, nie stanowią zagrożenia dla mikroflory środowiskowej ani rozwoju genów oporności w wyniku ekspozycji na materiały na bazie nanocelulozy, takie jak biosensory, membrany filtracyjne wody, urządzenia pamięciowe itp. To interesująca cecha nanocelulozy EC: nie ma ona wewnętrznej natury biobójczej i nie stanowi zagrożenia dla mikroorganizmów w erze oporności na środki przeciwdrobnoustrojowe. Nanoceluloza sama w sobie nie jest wszechstronnym środkiem przeciwdrobnoustrojowym, zwłaszcza w swojej niechemicznie modyfikowanej formie. Kwas szczawiowy wprowadza grupę karboksylową na powierzchnię CNC, co aktywuje jej powierzchnię do dalszej modyfikacji. Jednak nie jest wystarczające do zabijania mikroorganizmów.

Udana ekstrakcja nanocelulozy z biomasy oraz ustalenie metod ekstrakcji stworzyły podstawy dla mojego badania jej zastosowań. Ta droga, od ekstrakcji do zastosowania, stanowi istotny kamień milowy w moich badaniach, odzwierciedlając spójną i postępową ścieżkę badawczą.

Aby wykorzystać potencjalne zastosowania nanokryształów celulozy (CNC), opracowałam biodegradowalne kompozyty i nanokompozyty z wykorzystaniem skrobi z manioku oraz włókien łuski

ryżowej [H4]. Badania analizowały wpływ wymiarów włókien łuski ryżowej, od mikro- do nanoskali, oraz ich zawartości na właściwości biokompozytów na bazie skrobi.

Skrobia jest jednym z najbardziej obiecujących odnawialnych biopolimerów ze względu na jej powszechną dostępność, niski koszt, wszechstronność, biodegradowalność oraz zdolność do przekształcania w termoplastyczną skrobię pod wpływem ciepła i ścinania w obecności plastyfikatorów, takich jak woda i glicerol [15]. W tym procesie struktura granulek skrobi zostaje zniszczona i ulega plastyfikacji, czego efektem jest materiał zachowujący się podobnie do tradycyjnych tworzyw termoplastycznych. Ta właściwość sprawia, że skrobia jest atrakcyjnym materiałem do produkcji biodegradowalnych tworzyw sztucznych, powszechnie stosowanych w takich aplikacjach, jak folie do pakowania żywności, torby na zakupy czy splukiwalne produkty sanitarne.

Mimo że materiały na bazie skrobi oferują wiele zalet, ich słabe właściwości mechaniczne znacząco ograniczają możliwości ich zastosowania. Wśród różnych strategii mających na celu przezwycięzenie tych ograniczeń, wzmacnianie kompozytów skrobiowych włóknami jest szeroko stosowaną i skuteczną metodą poprawy ich właściwości.

Różne naturalne włókna były intensywnie badane pod kątem produkcji kompozytów na bazie skrobi (SB). Wśród nich łuska ryżowa, będąca istotnym odpadem rolniczym, wyróżnia się jako łatwo dostępne źródło, które stanowi 20% globalnej produkcji ryżu wynoszącej 500 milionów ton. Konwencjonalne metody utylizacji łuski ryżowej, takie jak spalanie na otwartej przestrzeni, niosą poważne zagrożenia dla środowiska i degradują obszary wokół nich. Aby ograniczyć te problemy, łuska ryżowa została zbadana pod kątem zastosowań komercyjnych, w tym jako materiał wzmacniający w kompozytach. Dodatkowo stanowi cenne źródło włókien celulozowych, ponieważ zawiera około 33% celulozy [16]. Dzięki unikatowym właściwościom fizycznym i chemicznym, nanokryształy celulozy (CNC) były szeroko stosowane jako środek wzmacniający w kompozytach skrobiowych. Podczas gdy liczne badania analizowały wykorzystanie skrobi w połączeniu z naturalnymi włóknami do tworzenia folii plastikowych, niniejsze badanie było nowatorskie, ponieważ wykazało, w jaki sposób różna grubość włókien łuski ryżowej wpływa na morfologię, właściwości mechaniczne i termiczne folii kompozytowych na bazie skrobi. Podkreślono również wyższą skuteczność CNC jako środka wzmacniającego, wskazując jego przewagę nad innymi dodatkami w poprawie właściwości folii SB, co stanowiło innowację w roku publikacji.

Kompozyty i nanokompozyty przygotowano metodą odlewania roztworów. Aby uzyskać włókna łuski ryżowej o różnych wymiarach, przeprowadzono trzy różne obróbki chemiczne surowych włókien, w tym traktowanie alkaliczne, bielenie oraz hydrolizę kwasową.

Morfologia surowych włókien łuski ryżowej, celulozy i nanocelulozy została zbadana w celu określenia rozmiarów włókien po każdym etapie obróbki chemicznej i hydrolizie kwasowej. Surowe wiązki włókien, początkowo mające średnicę 170 μm , zostały zredukowane do pojedynczych włókien

celulozowych o średnicy 7 μm . Ta redukcja wskazuje, że silna obróbka chemiczna skutecznie usunęła niemal wszystkie składniki wiążące fibrile w strukturę łuski ryżowej, umożliwiając oddzielenie włókien celulozowych na pojedyncze włókna. Mierząc średnicę włókna po każdej obróbce chemicznej, zaobserwowano, że średnica włókna pozostała taka sama jak w przypadku surowego włókna po obróbce alkalicznej, co wskazuje, że sama obróbka alkaliczna nie była w stanie usunąć wszystkich składników niecelulozowych z surowego włókna łuski ryżowej. Jednak po obróbce alkalicznej w pracach [H2] i [H3] zauważyłam redukcję rozmiaru. To odkrycie pokazuje, że obróbki chemiczne mają różny wpływ na różne włókna naturalne. Hydroliza kwasowa znacząco zmniejsza średnicę włókien celulozowych z łuski ryżowej z 7 μm do 15-20 nm, co zwiększa stosunek kształtu włókien do 10-15, prowadząc do zwiększenia powierzchni właściwej. Lepszą adhezję między matrycą a wypełniaczem uzyskano nie tylko dzięki usunięciu zanieczyszczeń, hemicelulozy i ligniny z otoczenia włókien, ale także poprzez zmniejszenie wymiarów wypełniacza, zwiększenie stosunku kształtu włókien, a co za tym idzie – zwiększenie powierzchni właściwej włókien.

Biokompozyty skrobiowe wydają się być przydatne w badaniach wpływu rozmiarów włókien celulozowych i powierzchni kontaktowej na ich wydajność mechaniczną. Zmniejszenie rozmiaru włókien poprawiło właściwości mechaniczne biokompozytów skrobiowych [H4]. Ta znacząca poprawa, szczególnie w przypadku biokompozytów skrobiowych wzmacnianych CNC, wynikała głównie z większej powierzchni i wyższego współczynnika kształtu CNC, co zapewniało lepszą zdolność wzmacniającą. Odbijało się to także w silnej interakcji międzyfazowej, która wystąpiła między skrobią a celulozą. Powstanie sztywnej sieci CNC, zwanej „siecią perkolacyjną”, było dodatkowym powodem wyższych właściwości mechanicznych. Interakcja między CNC za pomocą wiązań wodorowych wewnątrzcząsteczkowych i międzycząsteczkowych i/lub wzajemne splątanie między CNC a matrycą skrobiową stanowiło podstawę powstania „sieci perkolacyjnej”.

Dodanie włókien łuski ryżowej o różnych rozmiarach wykazało, że zmniejsza to właściwości wchłaniania wody biokompozytów skrobiowych. Ostateczne nanokompozyty te wykazywały poprawione właściwości odporności na wodę. Naturalna woskowa i nieco hydrofobowa powierzchnia włókien łuski ryżowej z natury redukuje wchłanianie wody, a obróbki chemiczne, które usunęły wosk, hemicelulozę i ligninę z włókien, dodatkowo zwiększają adhezję i interakcję między włóknami a matrycą, poprawiając tym samym odporność skrobi na wchłanianie wody. Interesujące jest to, że mimo iż nanoceluloza jest bardziej hydrofilowa, znacząco zmniejsza wchłanianie wody przez skrobię. Ta poprawa jest przypisywana powstawaniu sieci perkolacyjnej, która zapobiega dalszemu pęcznieniu skrobi i zwiększa jej odporność na wchłanianie wody. W przypadku wybielonych włókien w kompozytach skrobiowych redukcja wchłaniania wody wynika z konstrukcji splątanych włókien osadzonych w matrycy skrobiowej, które utrudniają ruch cząsteczek wody i czynią trudniejszym dyfuzję wody przez kompozyt. Obserwowano również wpływ włókien łuski ryżowej (surowych, poddanych obróbce alkalicznej i wybielonych) oraz nanocelulozy na właściwości termomechaniczne

(zmiany modułu w niskich i wysokich temperaturach) i termiczne (początek degradacji i inne zachowania termiczne) nanokompozytów.

Badania przedstawione w [H4] wykazują, że obróbka chemiczna jest skuteczną metodą ekstrakcji celulozy i izolacji nanokryształów celulozowych z włókien łuski ryżowej, a także poprawy interakcji na styku włókno-matryca. Dodatkowo, badanie to podkreśla efektywność redukcji rozmiaru i nanoskalowych wymiarów wzmocnienia w poprawie właściwości mechanicznych, termicznych i wchłaniania wody filmów biokompozytowych skrobiowych.

Podczas gdy nanoceluloza naturalnie dobrze przylega do skrobi ze względu na swoją częściowo hydrofilową naturę, wynikającą z obfitości grup hydroksylowych w jej strukturze, jej kompatybilność z tworzywami sztucznymi i polimerami hydrofobowymi jest ograniczona. Ograniczenie to stanowi wyzwanie przy rozważaniu wykorzystania nanocelulozy w różnych zastosowaniach przemysłowych, szczególnie tych związanych z systemami hydrofobowymi. Moje badania wykazały, że modyfikacja powierzchni znacząco zwiększa kompatybilność między nanocelulozą a matrycami polimerowymi, a także skutecznie zapobiega agregacji nanocelulozy. Dzięki redukcji napięcia powierzchniowego modyfikacje te poprawiają dyspersję i zwiększają powierzchnię [17-19], co prowadzi do zauważalnej poprawy właściwości termicznych i mechanicznych kompozytów. Ponadto modyfikacje powierzchni wprowadzają nowe grupy funkcyjne, umożliwiając dodatkowe zastosowania nanocelulozy w takich obszarach jak dostarczanie leków, filtracja i wiele innych. W rzeczywistości ta funkcjonalizacja nie tylko poprawia kompatybilność wypełniacza z matrycą, ale także nadaje nanocelulozie nowe właściwości, rozszerzając jej zastosowanie poza tradycyjne dziedziny. Dlatego moje badania skupiły się na modyfikacji powierzchni nanocelulozy, znacząco zwiększając jej potencjał aplikacyjny i otwierając nowe drogi do jej wykorzystania.

Wykorzystałam doświadczenie zdobyte podczas doktoratu w zakresie modyfikacji powierzchniowej CNC za pomocą aminosilanów, aby zaproponować i zbadać innowacyjne zastosowanie modyfikowanych powierzchniowo CNC do opracowania ekologicznego, bioopartego aerożelu absorbującego CO₂ [H5, H6].

Emisja dwutlenku węgla (CO₂) jest głównym czynnikiem napędzającym globalne ocieplenie i degradację środowiska, co sprawia, że wychwytywanie CO₂ jest kluczowym obszarem działań na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Obecne technologie wychwytywania CO₂ napotykają jednak istotne ograniczenia. Na przykład wodne roztwory amin, uznawane za standardową metodę, są energochłonne, podatne na korozję i kosztowne w regeneracji [20, 21]. Sorbenty stałe z kolei oferują wiele zalet, takich jak wysoka pojemność adsorpcji w warunkach otoczenia, niskie koszty regeneracji, szybka kinetyka, stabilność chemiczna i minimalna korozyjność [21, 22]. Jednak wiele istniejących stałych sorbentów, takich jak struktury metalowo-organiczne (MOF), krzemionka mezoporowata czy zeolity, może powodować wtórne zanieczyszczenia. Dodatkowo organiczne sorbenty CO₂, takie jak

nanoporowaty węgiel aktywny, często napotykają problem zablokowania mikroporów podczas impregnacji aminami organicznymi, co ogranicza ich efektywność [23]. Aby rozwiązać te problemy, zaproponowałam rozwiązanie polegające na opracowaniu aerożeli opartych na CNC modyfikowanych aminosilanami jako ekologicznego sorbentu stałego [H6].

Aminosilan, reagent krzemianowy powszechnie znany z modyfikacji włókien naturalnych i nanocelulozy, jest przede wszystkim stosowany w celu zwiększenia kompatybilności w kompozytach [17, 19, 24]. Dzięki swoim funkcjonalnym grupom aminowym aminosilan wykazuje znaczący potencjał poprzez chemiczne wiązanie się z nośnikami stałymi, zapewniając zarówno stabilność termiczną, jak i chemiczną.

Wśród materiałów bioopartych CNC są wyjątkowo korzystne do produkcji aerożeli ze względu na ich odnawialny charakter, wysoką krystaliczność, niskie koszty, biodegradowalność i dużą powierzchnię właściwą. Jak wspomniano wcześniej, CNC oferują również szerokie możliwości modyfikacji chemicznej dzięki obfitości grup hydroksylowych, co czyni je idealnym materiałem do zastosowania jako sorbenty w aerożelach. Aerożele oparte na CNC mają trójwymiarową porowatą strukturę, która maksymalizuje aktywną powierzchnię do wychwytywania CO₂, oferując znaczną poprawę pojemności adsorpcyjnej w porównaniu z tradycyjnymi aerożelami.

W artykule [H5] wprowadzono puste wiechy owocowe (EFB) – główne biomasy rolnicze o wysokiej zawartości celulozy (44,4%) i dużej dostępności w Malezji – jako nowe źródło nanocelulozy. Projekt obejmował również modyfikację powierzchni nanocelulozy za pomocą 3-(2-aminoetyloamino) propylodimetoksymetylosilanu (AEAPDMS) oraz kompleksową charakterystykę w celu oceny potencjału tego materiału bioopartego do zastosowań w filtracji powietrza.

Aby określić optymalne warunki modyfikacji powierzchni oraz idealną ilość grup funkcyjnych aminy na powierzchni CNC, modyfikację przeprowadzono w rozpuszczalniku woda/etanol (80/20 v/v) z różnymi proporcjami CNC do aminosilanu: 1:1, 1:2, 1:3 i 1:4 w/w%. Czynniki sprzęgające silan oddziaływały z grupami hydroksylowymi oryginalnej CNC, które zostały zastąpione przez grupy alkilo-tlenowe powstałe w wyniku hydrolizy grup silanolowych. Interakcję między CNC a aminosilanem potwierdzono za pomocą analizy FTIR. Dodatkowo oceniono krystaliczność i właściwości termiczne zarówno niemodyfikowanej, jak i zmodyfikowanej CNC, wykazując, że choć obróbka aminosilanem nieznacznie zmniejszyła wskaźnik krystaliczności CNC ze względu na zakłócenie zwartego regionu krystalicznego, zwiększyła stabilność termiczną oraz spójność z matrycami polimerowymi, takimi jak nienasycony poliestr i polichlorek winylu [17, 18].

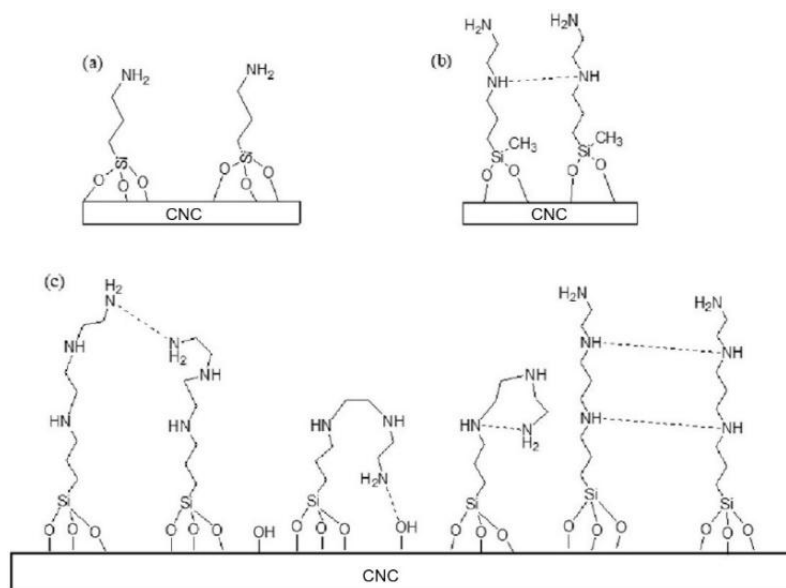
Bazując na celach określonych w [H5], badanie przedstawione w artykule [H6] analizowało wpływ różnych rodzajów modyfikacji aminosilanowych na CNC pozyskaną z EFB oraz oceniało jej potencjalne zastosowanie w produkcji aerożelu do wychwytywania CO₂. Trzy różne aminosilany – 3-(aminopropyl) trimetoksysilan (APTMS), AEAPDMS i N-(3-

trimetoksylilopropylo)dietylenotriamina (DET3) – zostały przyłączone do CNC za pomocą metody podobnej do opisanej w artykule [\[H5\]](#).

Badanie analizowało, jak różnice w długości łańcucha aminosilanu i zawartości azotu (N) wpływają na tworzenie porów, powierzchnię właściwą, stabilność termiczną oraz efektywność wychwytywania CO₂. W celu oceny tych właściwości przeprowadzono analizę adsorpcji gazu N₂. Kluczowe parametry, takie jak powierzchnia właściwa (S_{BET}), objętość porów i rozkład średnicy porów, określono za pomocą teorii Brunauera-Emmetta-Tellera (BET) oraz metodą Barretta-Joynera-Halendy (BJH). Ponadto średnia średnica porów została oceniona na podstawie zdolności adsorpcji przy ciśnieniu względnym (P/P_0) wynoszącym około 1,0.

Zaobserwowano, że zarówno aerozele z nanocelulozy, jak i z modyfikowanej nanocelulozy mają strukturę mezoporowatą, a ich zachowanie adsorpcyjne zależy od ciśnienia. Powierzchnia właściwa S_{BET} aerożeli wzrosła dla CNC (9,6 m²/g), APTMS-CNC (21,6 m²/g) i AEAPDMS-CNC (30,5 m²/g), odpowiednio, ale zmniejszyła się dla DET3-CNC (3,3 m²/g). Podobny trend zaobserwowano w przypadku objętości porów (V_t), ale różnił się w przypadku średniej średnicy porów, gdzie APTMS-CNC osiągnął najniższy wynik (182,6 Å), a AEAPDMS-CNC najwyższą średnią średnicę porów (279,3 Å). Trend ten prawdopodobnie wynika z pośredniej długości łańcucha AEAPDMS, który ma dwa atomy azotu jako aminę pierwotną i wtórną w środku łańcucha przyłączonego do aerożelu, co zwiększyło S_{BET} , V_t i średnią średnicę porów w porównaniu z krótkim łańcuchem APTMS z grupą aminową pierwotną. Jednak efekt ten jest całkowicie odwrotny w przypadku aminosilanu o długim łańcuchu, takiego jak DET3, z wieloma atomami azotu, co spowodowało zmniejszenie S_{BET} i V_t po modyfikacji. Wyniki te wskazują, że długi łańcuch obniżył powierzchnię właściwą i objętość porów z powodu blokady mezoporów i niektórych makroporów.

Pomiar adsorpcji CO₂ wykazał, że wszystkie aerozele amino-CNC wykazywały wyższą zdolność adsorpcji CO₂ niż aerożel CNC, co przypisano chemisorpcji zasadowych grup aminowych z kwasowym CO₂. W kontekście adsorpcji gazu CO₂ powierzchnia właściwa stała się mniej istotna, a kolejność adsorpcji była odwrotna w stosunku do liczby atomów azotu w aminosilanie. Zjawisko to wyjaśniono jako efekt utrudnienia podczas procesu przyłączania, gdzie silan składał się, szczególnie w przypadku aminosilanów o pośredniej i długiej długości łańcucha. Długi łańcuch aminosilanu prawdopodobnie składał się przy atomie -N aminy, z wystąpieniem wiązań wodorowych między grupami -NH aminosilanów, jak pokazano na [Rysunku 6](#), co powodowało przeszkody steryczne.



Rysunek 6. Schematyczny diagram ilustrujący oddziaływania między aminosilanami przyszczepionymi na powierzchni CNC: (a) APTMS-CNC, (b) AEAPDMS-CNC, and (c) DET3-CNC [H6].

Zaobserwowano zjawisko, w którym niższa zdolność adsorpcji CO_2 przez aerożele amino-CNC o wyższej zawartości azotu była przypisywana chemisorpcji, która pozwala jedynie na adsorpcję monowarstwową. Natomiast zastosowanie APTMS, krótkołańcuchowego aminosilanu z pojedynczą grupą aminową, sprzyjało fizycznej sorpcji, umożliwiając adsorpcję wielowarstwową. Co istotne, odkryto również, że zdolność adsorpcji CO_2 zależy od charakteru grup aminowych, a reaktywność zmienia się zgodnie z kolejnością: aminy pierwotne, wtórne i trzeciorzędowe.

Zdolność adsorpcji CO_2 aerożelu CNC-APTMS wyniosła 0.20 mmol/g i jest lepsza niż w przypadku APTMS-Halloysite [25] oraz aerożelu CNF-4% APS (N-(2-aminoethyl)-3-aminopropylmetyldimetoksyzil) (0.217 mmol/g) [26]. W związku z tym można stwierdzić, że adsorbent aerożelu CNC szczepiony APTMS z grupą aminy pierwotnej ma najwyższą zdolność adsorpcji CO_2 i ma potencjał, aby być rozwijany dalej jako bioorganiczny adsorbent do wychwytywania CO_2 . Dlatego badania przedstawione w artykułach [H5] i [H6] wykazały znaczenie wykorzystania CNC oraz jego chemicznej modyfikacji powierzchni w celu opracowania bioorganicznego adsorbentu do wychwytywania CO_2 . Pokazuje to również jedną z potencjalnych aplikacji CNC oraz wprowadza systematyczną korelację między długością łańcucha a zawartością atomów azotu w środkach wiążących a zdolnością adsorpcji CO_2 aerożelu, co stanowi cenne wskazówki dotyczące optymalizacji modyfikacji CNC dla lepszej wydajności adsorbentu CO_2 .

Zgodnie z celami badawczymi dotyczącymi badania wpływu modyfikacji powierzchniowych na nanocelulozę, rozszerzania jej potencjalnych zastosowań i opracowywania materiałów na bazie nanocelulozy, artykuł [H7] przedstawia nową aplikację: aerożele hydrofobowo-oleofilowe zaprojektowane do pochłaniania ropy. Pełniłam rolę współopiekuna i współbadacza tego projektu.

Wycieki ropy są jednymi z najbardziej niszczycielskich zanieczyszczeń, stanowiąc poważne zagrożenie dla ekosystemów wodnych i zdrowia środowiska. Aerożele, znane z lekkich, porowatych, trójwymiarowych struktur, stały się obiecującymi materiałami do walki z zanieczyszczeniem spowodowanym wyciekami ropy. Tradycyjnie aerożele były wytwarzane z krzemionki lub polimerów organicznych i nieorganicznych przy użyciu suszenia nadkrytycznego. Jednak te materiały często napotykają na wyzwania, takie jak łamliwość, słaba retencja, toksyczność i ograniczona trwałość, co utrudnia ich wykorzystanie w zastosowaniach wymagających silnych właściwości mechanicznych i kompatybilności środowiskowej. Aby przezwyciężyć te ograniczenia, zaproponowałam opracowanie aerożeli hydrofobowo-oleofilowych pochodzących z CNC i żelatyny [H7]. Celem tego badania było stworzenie zrównoważonych, ekologicznych aerożeli o ulepszonych właściwościach mechanicznych do skutecznego pochłaniania ropy, co dodatkowo koresponduje z ogólnym celem badawczym, jakim jest wykorzystanie nanocelulozy w ekologicznych, wysokowydajnych aplikacjach. W tym projekcie zastosowano zieloną technologię produkcji, w tym procesy sol-gel (podobna technika jak zaprezentowana w artykułach H5 i H6), napromieniowanie gamma oraz suszenie próżniowe. Metoksytrimetylosilan (MTMS) został użyty jako czynnik chemiczny w celu poprawy właściwości hydrofobowych CNC do zastosowań w pochłanianiu ropy dzięki swojej hydrofobowej łańcuchowej strukturze alkilowej. Krucha struktura CNC została wzmocniona żelatyną jako spoiwem. Cząsteczki żelatyny zostały skrzyżowane za pomocą napromieniowania gamma w celu wzmocnienia ich efektu wzmacniającego na CNC. Nasze badania są uważane za pierwsze, które badają żelatynę jako potencjalne spoiwo w aerożelach CNC, w przeciwieństwie do wcześniejszych badań, które jedynie zgłaszały stosowanie CNC jako agenta wzmacniającego dla żelatyny [27, 28]. Aerożele CNC/żelatyna napromieniowane gamma zostały wyprodukowane za pomocą techniki suszenia próżniowego.

Modyfikacja powierzchni skutecznie zhydrofobizowała CNC (Rysunek 7), a zmodyfikowane MTMS-CNC wykazały zwiększoną hydrofobowość aerożelu gamma-naświetlanego CNC-MTMS/żelatyna, przy czym wartość kąta kontaktu z wodą wyniosła 118° nawet po 20 minutach. Ponadto zaobserwowano poprawione właściwości hydrofobowe i oleofilowe, gdzie krople wody pozostały na powierzchni aerożelu, podczas gdy olej był całkowicie absorbowany przez aerożel.

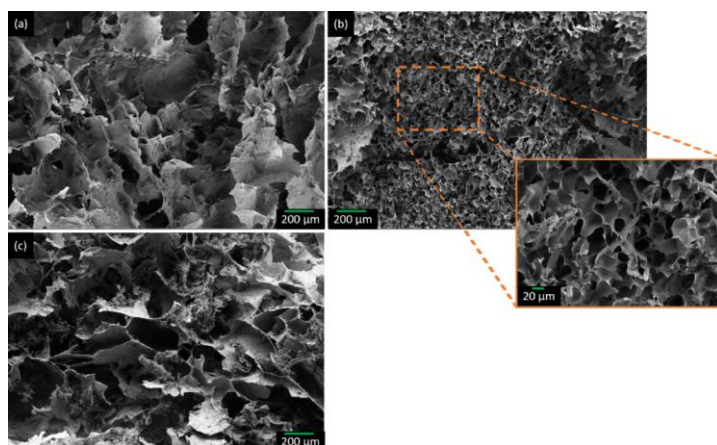


Rysunek 7. Krople wody i olej surowy na powierzchni gamma-naświetlanego CNC-MTMS

Stwierdzono, że wskaźnik krystaliczności CNC zmniejszył się po modyfikacji MTMS oraz dodaniu żelatyny. Sugerujemy, że ta redukcja po dodaniu żelatyny jest spowodowana jej amorficzną naturą,

natomiast niższy wskaźnik krystaliczności CNC po modyfikacji MTMS przypisujemy słabej regularności strukturalnej warstwy polisiloksanowej na powierzchni CNC. Wyniki te były podobne do tych uzyskanych w artykule [H5]. Ponadto zaobserwowano, że naświetlanie gamma nieznacznie zwiększyło wskaźnik krystaliczności aerożelu CNC/żelatyna w porównaniu do CNC/żelatyna bez naświetlania gamma. Wzrost wskaźnika krystaliczności aerożelu CNC/żelatyna po naświetlaniu gamma był wynikiem promowania sieciowania, degradacji obszarów amorficznych oraz reorganizacji łańcuchów polimerowych, co prowadziło do bardziej uporządkowanej i krystalicznej struktury w aerożelu.

Badania mikroskopowe ujawniły, że aerożel CNC/żelatyna wykazywał różne rozmiary porów oraz szorstkość powierzchni. Jednak naświetlanie gamma sprawiło, że organizacja porów stała się bardziej jednorodna. Naświetlanie gamma również zmniejszyło rozmiar porów z 66.8 μm do 48.4 μm z dość dużym rozrzutem wyników. Dodanie MTMS zwiększyło szorstkość powierzchni aerożelu (Rysunek 8). Rozmiar porów nieznacznie zwiększył się po dodaniu MTMS, z 48.4 μm do 59.8 μm , również z dość dużym rozrzutem wyników pomiarów. Pomimo tego wzrostu, rozmiar porów pozostał mniejszy niż w przypadku nie-naświetlanego aerożelu CNC/żelatyna. Zwiększona szorstkość powierzchni poprawia właściwości hydrofobowe, co potwierdza skuteczność modyfikacji CNC.



Rysunek 8. Mikrografie SEM (a) aerożelu CNC/żelatyna, (b) gamma-naświetlanego aerożelu CNC/żelatyna, (c) gamma-naświetlanego aerożelu CNC-MTMS/żelatyna [H7].

Właściwości hydrofobowe i oleofilowe aerożeli były dalej badane w tym artykule poprzez testy selektywnej absorpcji w chloroformie oraz surowym oleju zmieszonym z wodą destylowaną. Zaobserwowano, że naświetlany modyfikowany aerożel selektywnie absorbuje chloroform i surowy olej z mieszaniny wody. Wyprodukowany gamma-naświetlany aerożel CNC-MTMS/żelatyna mógł absorbować 430% swojej wagi, a nawet po ośmiu kolejnych cyklach, procent absorpcji nie wykazywał znaczącego spadku, co ujawnia doskonałą zdolność do ponownego użycia aerożelu.

Wyniki przedstawione w artykule [H7] pokazują, że modyfikowany MTMS CNC skutecznie poprawia hydrofobowość i oleofilowość aerożeli, jednocześnie wykazując doskonałą możliwość ponownego

użycia i integralność strukturalną w porównaniu do tradycyjnych aerożeli. Innowacyjne podejście polegające na zastosowaniu żelatyny jako spoiwa, wraz z napromieniowaniem gamma, stanowi nowatorski wkład w tę dziedzinę i otwiera nowe ścieżki dla ekologicznych rozwiązań materiałowych w różnych zastosowaniach przemysłowych.

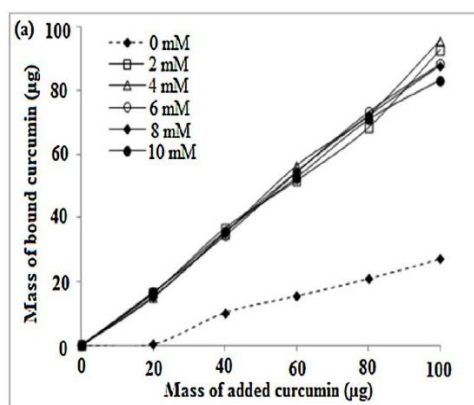
Opierając się na sukcesie aerożeli modyfikowanych MTMS CNC, w artykule [H8] zgłębiłam strategię modyfikacji powierzchni nanocelulozy. Rozumiejąc szerokie możliwości zastosowań hydrofobowych CNC, postanowiłam poszerzyć ich funkcjonalną wszechstronność, badając alternatywne techniki modyfikacji. Doprowadziło to do użycia bromku cetylotrimetyloammonowego (CTAB) jako środka modyfikującego, wybranego ze względu na jego zdolność nadawania hydrofobowości, a także zwiększania kompatybilności z związkami bioaktywnymi, takimi jak kurkumina. Kurkumina, główna substancja bioaktywna w przyprawie, kurkumie, wykazuje właściwości przeciwzapalne. Celem tej pracy było zbadanie, jak modyfikacje powierzchni mogą precyzyjnie dostosować właściwości CNC do specyficznych zastosowań, w tym wiązania i stabilizacji związków hydrofobowych. Skupiając się na CTAB, chciałam dalej rozwinąć CNC jako materiał wielofunkcyjny, z potencjalnymi zastosowaniami w dziedzinach przemysłowych i biomedycznych.

Projekt ten powstał z potrzeby zajęcia się niską rozpuszczalnością i stabilnością kurkuminy, naturalnego związku znanego ze swoich silnych właściwości przeciwutleniających, przeciwzapalnych i przeciwdrobnoustrojowych. Pomimo znacznego potencjału terapeutycznego, słaba biodostępność kurkuminy stanowiła główną przeszkodę dla jej szerszego zastosowania. Aby sprostać pilnej potrzebie materiałów zdolnych do skutecznego wiązania kurkuminy i zwiększania jej stabilności, rozpuszczalności i użyteczności w praktycznych zastosowaniach, modyfikacja CNC za pomocą CTAB wyłoniła się jako obiecujące rozwiązanie w celu przezwyciężenia tych ograniczeń. CNC została zidentyfikowana jako idealny nośnik ze względu na jej zrównoważone pochodzenie, biokompatybilność i modyfikowalną chemię powierzchni. Włączenie CTAB stworzyło hydrofobową powierzchnię na CNC, umożliwiając silne interakcje z kurkumina i poprawiając jej stabilność przy jednoczesnym zachowaniu przyjaznego dla środowiska profilu materiału. To podejście nie tylko rozwiązało ograniczenia kurkuminy, ale także podkreśliło potencjał CNC modyfikowanego CTAB jako wszechstronnej platformy do dostarczania i stabilizacji hydrofobowych związków bioaktywnych.

Aby uzyskać optymalną hydrofobowość CNC oraz odpowiednią ilość modyfikatora, przetestowano różne zawartości CTAB, a wyniki zostały opisane w artykule [H8]. Modyfikacja CNC poddanych hydrolizie kwasem z użyciem CTAB polega na adsorpcji cząsteczek CTAB na powierzchni nanokrystalitów celulozy za pomocą interakcji elektrostatycznych. CTAB, będący kationowym surfaktantem, wchodzi w interakcję z ujemnie naładowanymi powierzchniami nanokrystalitów celulozy. Obecność CTAB zmienia ładunek powierzchniowy, hydrofobowość i ogólną energię powierzchniową nanokrystalitów, co wpływa na ich dyspersję, stabilność i interakcje z innymi materiałami.

Badania FTIR potwierdziły modyfikację powierzchni CNC za pomocą CTAB, a także wykazały, że wiązanie jonowe pomiędzy kationowym CTAB a anionowymi grupami esterów siarczanowych na CNC jest stabilne i nie podlega wpływowi siły jonowej, pH ani stężeniu surfaktanta. CNC zostały pozyskane z włókien bastowych kenafu zgodnie z metodologią, którą zaproponowałem i opublikowałam przed tym projektem [9]. Uzyskane CNC mają wskaźnik kształtu (L/D) równy 13.4, który po modyfikacji powierzchniowej zmniejsza się do 11.1. Podobnie jak w wynikach przedstawionych w artykułach [H5] i [H7], zaobserwowano, że wskaźnik krystaliczności nieznacznie zmniejszył się po modyfikacji powierzchni CNC z użyciem CTAB. W przeciwieństwie do tego, zabiegi alkaliizowania, bielenia i hydrolizy kwasowej surowych włókien prowadziły do wzrostu krystaliczności. Jak wcześniej wspomniano, modyfikacja powierzchni może zakłócać strukturę krystaliczną celulozy, prowadząc do zmniejszenia krystaliczności. Jednak CNC zmodyfikowane CTAB wykazywały wyższą stabilność termiczną w porównaniu do wersji niemodyfikowanej. Aby określić zawartość azotu w reakcjach, co reprezentuje ilość surfaktantu, zmierzono stopień podstawienia (DS). Zaobserwowano, że w miarę zwiększania się stężenia surfaktantu CTAB wartość DS po modyfikacji malała. Najwyższą wartość DS dla modyfikacji CNC uzyskano przy stężeniu CTAB wynoszącym 4 mM, potwierdzoną przez FTIR poprzez wykrycie wyższej intensywności grup funkcyjnych CTAB.

Hydrofobowość zmodyfikowanego CNC oraz wpływ zawartości CTAB adsorbowanego na powierzchniach CNC zostały przetestowane poprzez śledzenie efektywności wiązania leku hydrofobowego - kurkuminy. Stwierdzono, że w przypadku braku CTAB około 27% z 100 µg dodanej kurkuminy było związane. Ilość kurkuminy związanej z modyfikowanym CTAB–CNC znacznie wzrosła w miarę zwiększania masy leku dodanego do zawiesiny CTAB–CNC. Zmodyfikowane CTAB–CNC wykazały większą ilość związanej kurkuminy w porównaniu do niemodyfikowanego CNC. W każdym przypadku efektywność wiązania (BE%) kurkuminy z nanocząstkami CTAB–CNC wahała się od 80% do 96%. Jednak w miarę dalszego zwiększania stężenia CTAB wystąpił spadek ilości związanej kurkuminy. Modyfikacja CNC za pomocą 4 mM CTAB skutkowała optymalnym wiązaniem kurkuminy. Przy tym optymalnym stężeniu CTAB, BE% dla zmodyfikowanego CTAB–CNC wynosiło około 96% dla maksymalnie 100 µg dodanej kurkuminy. Stosunkowo wyższe BE% nanocząstek CTAB–CNC 4 mM w porównaniu do innych zmodyfikowanych nanocząstek CTAB–CNC może być spowodowane bardziej hydrofobowym fragmentem i silniejszymi interakcjami hydrofobowymi (Rysunek 9). BE% kurkuminy na zmodyfikowanym CTAB–CNC była zależna od hydrofobowości jego powierzchni. Dlatego im bardziej hydrofobowe były powierzchnie CTAB–CNC, tym więcej kurkuminy mogło być związane. Przy niższych stężeniach pojedyncze cząsteczki surfaktantu są adsorbowane z ich łańcuchami alkilowymi skierowanymi na zewnątrz, co prowadziło do hydrofobowego CNC. Jednak przy wyższych stężeniach, surfaktant może agregować na powierzchniach CNC, co ogranicza wzrost hydrofobowości CNC.



Rysunek 9. (a) Wiązanie kurkuminy z CTAB–CNC w 10 mM NaCl przy stężeniach CTAB wynoszących 0 mM, 2 mM, 4 mM, 6 mM, 8 mM i 10 mM.

Uzyskane zmodyfikowane CNC z CTAB zostały następnie wykorzystane do przygotowania mikroemulsji do miejscowego dostarczania kurkuminy, aby ocenić jej skuteczność jako nośnika leku oraz jej potencjał do zwiększenia biodostępności i skuteczności terapeutycznej kurkuminy w zastosowaniach miejscowych. Badania *in vitro* dotyczące przenikania przez skórę wykazały skuteczne dostarczanie kurkuminy przez skórę, a mikroemulsje wykazały znaczne skumulowane tempo przenikania i przepływu. Podkreśla to potencjał mikroemulsji CTAB-CNC do zastosowań w miejscowym dostarczaniu leków [29].

Po przeprowadzeniu obszernego badania nad nanocelulozą i jej różnymi zastosowaniami, przedstawionymi w wyżej wymienionych projektach i publikacjach, artykuł [H9] konsoliduje te wyniki i przedstawia kompleksowy przegląd roli nanocelulozy w rozwoju polimerów biodegradowalnych, polimerów termoplastycznych i porowatych nanokompozytów. Analizując kluczowe badania z artykułów [H1-H8], ten artykuł przeglądowy podsumowuje znaczące postępy dokonane w badaniach nad nanocelulozą, podkreślając jej rolę w zrównoważonym rozwoju i innowacjach materiałowych. Artykuł rozpoczyna się od przeglądu nanocelulozy, podkreślając jej rodzaje - nanokryształy celulozy i nanowłókna celulozowe oraz ich unikatowe właściwości, takie jak wysoka wytrzymałość mechaniczna, duża powierzchnia oraz biodegradowalność. Następnie zagłębiłam się w różne metody wprowadzania nanocelulozy do matryc polimerowych, podkreślając znaczenie jednorodnej dyspersji w celu osiągnięcia pożądaných właściwości. Omówiono techniki przetwarzania, takie jak odlewanie roztworu, mieszanie w stanie stopionym i polimeryzacja *in-situ*. Po wnikliwej analizie rozproszonych publikacji na ten temat zaproponowałam systematyczne zasady dotyczące przetwarzania, właściwości i zastosowań kompozytów na bazie nanocelulozy. Jednym z kluczowych czynników jest zapewnienie jednorodnej dyspersji nanocelulozy w matrycy polimerowej. Techniki takie jak sonikacja, mieszanie pod wysokim ciśnieniem oraz użycie surfaktantów lub czynników łączących zostały omówione i porównane, biorąc pod uwagę zalety i wady każdej metody.

Innym ważnym czynnikiem była modyfikacja powierzchni nanocelulozy, która poprawia jej kompatybilność z matrycą polimerową. Metody takie jak chemiczne szczepienie, silanizowanie i użycie kompatybilizatorów były przykładami technik modyfikacji. Optymalizacja warunków przetwarzania, takich jak temperatura, ciśnienie i prędkość mieszania, jest również niezbędna, aby zapobiec degradacji zarówno nanocelulozy, jak i matrycy polimerowej, zapewniając integralność końcowego materiału kompozytowego. Ponadto omówiłam, w jaki sposób dodatek nanocelulozy znacząco poprawia właściwości mechaniczne, termiczne i barierowe biodegradowalnych polimerów i tworzyw termoplastycznych, dzięki czemu nadają się one do zastosowań wymagających dobrych właściwości. Badałam różnorodne zastosowania tych kompozytów, takie jak materiały opakowaniowe, urządzenia biomedyczne i przyjazne dla środowiska alternatywy dla konwencjonalnych tworzyw sztucznych. Omówiono również wykorzystanie nanocelulozy w piankach i aerożelach do zastosowań w izolacji, filtracji i inżynierii tkankowej.

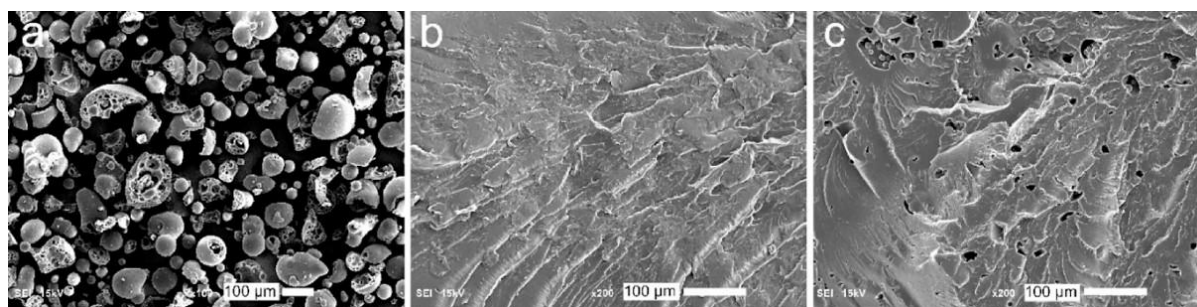
Dyskusja na temat korzyści środowiskowych wynikających z użycia kompozytów wzmacnianych nanocelulozą, w tym biodegradowalności i zmniejszenia zależności od plastyków opartych na paliwach kopalnych, zgodnie z celami zrównoważonego rozwoju, również została podjęta w artykule [H9]. Pomimo obiecujących właściwości i zastosowań, omówiono także wyzwania takie jak skalowalność, opłacalność i stabilność długoterminowa oraz niektóre rozwiązania, mogące przezwyciężyć te bariery i w pełni wykorzystać potencjał kompozytów na bazie nanocelulozy.

Artykuł [H9] zdobył wysoką liczbę cytowań (463, GS, Grudnia 2024), co podkreśla jego globalny wpływ i ustanawia go jako kluczowy punkt odniesienia dla badaczy pragnących wykorzystać potencjał materiałów na bazie nanocelulozy w różnych branżach. Ten artykuł nie tylko podkreśla wieloaspektowe zastosowania nanocelulozy, ale także identyfikuje kluczowe luki badawcze i wyzwania, torując drogę dla przyszłych badań i postępu technologicznego w tej dziedzinie.

Opierając się na podstawowych badaniach szczegółowo opisanych w artykułach [H1] do [H9], moja praca nadal eksploruje ogromny potencjał materiałów na bazie nanocelulozy. Jednak uznając potrzebę dalszej innowacji i dywersyfikacji, moja obecna ścieżka badawcza została rozszerzona o ligninę i nanoligninę. Te nowe materiały pochodzenia biologicznego oferują obiecujące możliwości zwiększenia wydajności i zrównoważenia materiałów kompozytowych. To rozszerzenie jest naturalnym postępem moich wcześniejszych badań, mających na celu przezwyciężenie ograniczeń istniejących materiałów i zaspokojenie rosnącego zapotrzebowania na bardziej ekologiczne alternatywy w nauce o materiałach polimerowych. Włączenie ligniny i nanoligniny wprowadza nowe wymiary do moich badań, w szczególności w zakresie opracowywania zaawansowanych kompozytów o ulepszonych właściwościach mechanicznych, termicznych i barierowych. W tym kontekście w projekcie przedstawionym w [H10] zazaczyłam kamień milowy w rozwoju zrównoważonych kompozytów polimerowych. W tych pracach zbadano synergistyczne efekty włączania cząstek ligniny typu kraft (KLP) do kompozytów PBAT (biodegradowalny kopolimer alifatyczno-aromatyczny), wykazując

transformacyjny wpływ ligniny na właściwości materiału i rozszerzając potencjalne zastosowania zielonych kompozytów. PBAT został wybrany do tego badania ze względu na swoją elastyczność, przetwarzalność i przyjazność dla środowiska. Łączy wytrzymałość i elastyczność konwencjonalnych tworzyw sztucznych z zaletą kompostowalności, co czyni go obiecującym kandydatem do rozwoju zielonych kompozytów. Jednak ograniczenia PBAT, takie jak niska wytrzymałość mechaniczna, stanowią wyzwanie dla szerszych zastosowań. Aby rozwiązać te wady i ocenić wzmacniające efekty KLP, badanie skupiło się na właściwościach morfologicznych, termicznych, krystalicznych, makro i mikromechanicznych kompozytów PBAT-lignina. Wprowadzenie ligniny do PBAT miało na celu poprawę wydajności i funkcjonalności PBAT, dodatkowo umacniając jego rolę jako jednego z kluczowych materiałów polimerowych w zrównoważonej gospodarce.

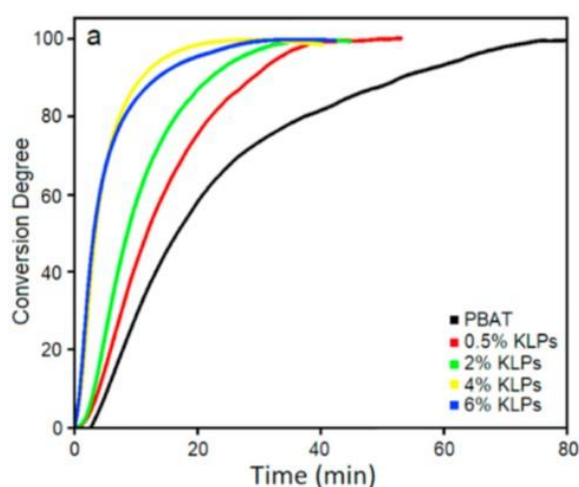
Kompozyty przygotowano poprzez dodanie różnych ilości (od 0,5 do 6% wag.) KLP do PBAT przy użyciu mini-wyłazarki ślimakowej. Aby ocenić efektywność wzmocnienia i inne efekty wprowadzenia mikrocząstek ligniny kraftowej (KLP), zbadano morfologię, właściwości termiczne, makro- i mikro-mechaniczne, oraz krystaliczność kompozytów poli(butylen adipinian-co-tereftalan) (PBAT)-lignina. Zaobserwowano dwie różne morfologie KLP po etapie wytłaczania kompozytu: nieregularne/połamane oraz kuliste kształty. Wydaje się, że większe kuliste cząstki o rozmiarze 100–160 μm uległy załamaniu podczas przetwarzania kompozytu, podczas gdy małe cząstki o rozmiarze poniżej 100 μm zachowały swój kształt i pozostały kuliste. Można to zaobserwować na powierzchni przełomów. Widoczne duże cząstki ligniny na [Rysunku 10a](#), które mają porowate struktury wewnętrzne, co może być powodem ich kruchości. Powierzchnia przełomu czystego PBAT wykazuje szorstką powierzchnię z wyraźnie chropowatą powierzchnią, skierowaną w kierunku propagacji złamania. Natomiast kompozyt zawierający KLPs ma szorstką powierzchnię z otworami. Otwory na mikrografiach reprezentują miejsca, w których znajdowały się KLPs. Duże KLPs zostały wyciągnięte z powierzchni złamanej matrycy, co potwierdza słabą adhezję między wypełniaczami a matrycą. Jednak małe KLPs pozostały w matrycy i zachowały swoje kuliste kształty po przetwarzaniu kompozytu. Oczywiście jest, że kształt otworów był również nieregularny, podobnie jak czyste KLPs, a ich rozmiar mieścił się w zakresie rozmiaru KLPs, co potwierdza brak agregacji.



Rysunek 10. Mikrograf cząstek ligniny (a) oraz powierzchnia cryo-złamanego czystego PBAT (b) i kompozytu z 6% wag. KLPs (c).

Wpływ KLP na właściwości mechaniczne PBAT oceniano za pomocą testu rozciągania. Stwierdziłam, że wytrzymałość na rozciąganie PBAT wzrosła o 30% przy 0.5% wag. KLPs, a następnie zmniejszała się wraz ze wzrostem zawartości napelnacza. Jednak wszystkie kompozyty wykazały wyższą wartość wytrzymałości niż czysty PBAT, z wyjątkiem 6% KLP. Uzyskane wyniki dla kompozytów z 0.5% wag. KLPs są dość interesujące, ponieważ wcześniejsze badania wykazały znaczne zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy dodaniu innych składników, na przykład nanocelulozy [30], octanu celulozy [31], fusów kawowych [32] oraz organomontmorylonitu [33]. Stwierdzono również, że KLP z pszenicy oraz lignina sodowa znacznie redukują wytrzymałość na rozciąganie PBAT [34, 35]. Dodatkowo stwierdziłam, że lignina działa jako czynnik zarodkujący krystalizację PBAT, istotnie przyspieszając jego krystalizację:

- podczas chłodzenia ze stanu stopionego, początek krystalizacji jest o 20°C wyższy w porównaniu do czystego PBAT.
- Połwkowy czas krystalizacji jest znacznie skrócony, z 5 minut do 0.7 minuty, co wskazuje na szybszą krystalizację, co dramatycznie skróci cykl formowania wtryskowego (Rysunek 11).
- podczas chłodzenia z prędkością 10 °C/min, krystalizacja PBAT zawierającego 6% KLPs kończy się w takim stopniu, że podczas kolejnego ogrzewania wyeliminowana jest zimna krystalizacja: kompozyt po przetworzeniu i zestaleniu staje się stabilny.

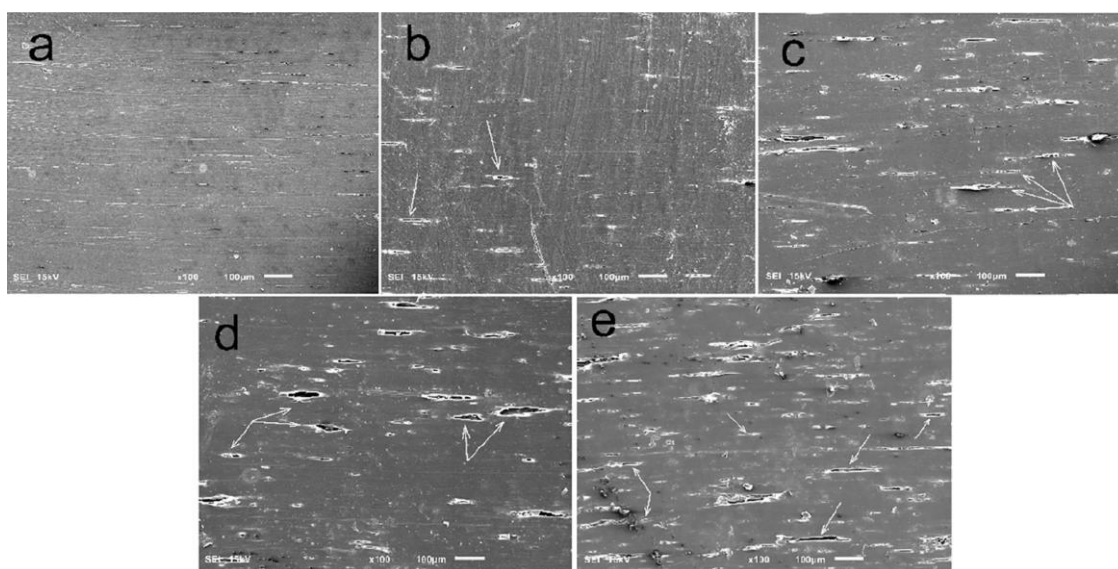


Rysunek 11. Przemiana stopu kompozytów PBAT w materiał krystaliczny w funkcji czasu w temperaturze 115°C [H10].

Zaobserwowałam również, że KLP zwiększyło część rzeczywistą modułu sprężystości kompozytów, a temperatura zeszklenia (T_g) przesunęła się do niższej wartości. Ponadto obecność KLP nieznacznie zmniejszyła początek degradacji kompozytów PBAT, podczas gdy zaobserwowano wyższy poziom pozostałości popiołu. Artykuł [H10] był także częścią projektu NCN zatytułowanego „Kawitacja w nanokompozytach polimerowych”, którym kierował prof. Gałęski, a ja byłam współbadaczem projektu. Dlatego w tym celu badano odrywanie cząstek

ligniny od polimeru, kawitację polimeru, ich wpływ na uszkodzenia i destrukcję kompozytów oraz zmiany właściwości mechaniczne.

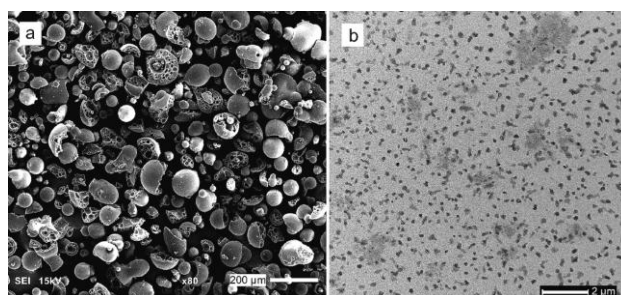
Analiza morfologii powierzchni filmów kompozytowych po złamaniu ujawniła, że czysty PBAT miał gładką powierzchnię, podczas gdy kompozyty PBAT/KLP wykazywały chropowatość powierzchni z powodu formowania się jam. Te jamy, które zwiększały się liczbowo i objętościowo wraz z wyższą zawartością KLP, były wydłużone elipsoidalnie w kierunku rozciągania i były związane z lokalizowanym ścinaniem oraz strefami koncentracji naprężeń, które sprzyjały odrywaniu ([Rysunek 12](#)).



Rysunek 12. Mikrograf SEM rozciągniętych (aż do zerwania) a) PBAT, b) kompozytów 0,5% KLP, c) 2% KLP, d) 4% KLP, e) 6% KLP. Kierunek deformacji jest poziomy [\[H10\]](#).

Nasze wyniki również pokazują, że podczas testu rozciągania, podczas gdy czysty PBAT wykazywał jednolitą deformację bez znacznego szybkowania i tylko nieznaczny wzrost objętości (około 5%) z powodu niskiego współczynnika Poissona, wprowadzenie cząstek ligniny kraftowej (KLP) znacząco zmieniło zachowanie kompozytów. Wraz ze wzrostem zawartości KLP zauważono wyraźny wzrost odkształcenia objętości—do 20% dla PBAT/6% KLP—co wskazuje na odrywanie cząstek wypełniacza od matrycy PBAT oraz kawitację. Dalsza analiza za pomocą rentgenowskiego rozpraszania niskokątowego SAXS potwierdziła powstanie nanoporów, szczególnie w zakresie od 10 nm do 40 nm, skierowanych w kierunku rozciągania z powodu procesu odrywania w polarnych obszarach między PBAT a KLP. To odrywanie, które rozpoczęło się przy lokalnym odkształceniu 0.1, prowadziło do jednoczesnego wzrostu porów o rozmiarach mikrometrowych, co skutkowało silnym wybieleniem materiału. Co ciekawe, nie zaobserwowano takich porowatych struktur w PBAT bez KLP, co wskazuje, że obecność KLP jest kluczowa dla zaobserwowanych zjawisk.

Aby rozszerzyć moje badania i określić wpływ redukcji wielkości ziaren napelnacza w biokompozytach na bazie ligniny, zaproponowałam projekt przedstawiony w artykule [H11]. Niniejszy artykuł koncentruje się na produkcji nanocząstek ligniny (LNPs), ich redukcji rozmiarów i wpływie LNP na właściwości mechaniczne, termiczne, morfologiczne, cytotoksyczne, przeciwutleniające, przeciwbakteryjne i przeciwwirusowe PBAT, a także ich potencjalnych zastosowaniach i zaletach. Wśród asortymentu wypełniaczy biopochodnych i organicznych LNP wyłoniły się jako stosunkowo nowa klasa, przyciągając dużą uwagę ze względu na ich odnawialne, biodegradowalne i przyjazne dla środowiska atrybuty podobne do pierwotnej ligniny. Jednak przedstawiają one znaczące zalety w porównaniu z pierwotną ligniną, sugerując ulepszone właściwości biologiczne, termiczne, przeciwutleniające i przeciwbakteryjne. Wytworzyłam LNP za pomocą techniki wytrącania. Morfologię pierwotnej ligniny (LP) i nanoligniny (LNP) przedstawiono na mikrofotografii SEM na Rysunku 13. LP wykazują zaokrąglone, nieregularne kształty z szerokim rozkładem wielkości cząstek, wynoszącym średnio 50 μm . Natomiast obraz TEM LNP ujawnia nanocząstki o bardziej jednolitym rozkładzie wielkości, wynoszącym średnio 150 nm. Mechanizm powstawania LNP został dokładnie omówiony w artykule [H11].



Rysunek 13. a) Obraz SEM LP, b) Obraz TEM LNP.

Nanokompozyty LNP z PBAT zostały przygotowane poprzez mieszanie w stanie stopionym z różnymi stężeniami do 6% wag. W artykule [H10] PBAT na bazie ligniny zawierający 0.5% wag wykazuje poprawione właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie i elastyczność, w porównaniu do czystych polimerów. Natomiast dla PBAT na bazie nanoligniny zaobserwowano spadek wytrzymałości na rozciąganie, podczas gdy moduł rozciągania wzrastał wraz ze wzrostem zawartości napelnacza. Obserwowana różnica w wytrzymałości na rozciąganie PBAT przy wprowadzeniu 0.5% mikrocząstek w porównaniu do nanocząstek może być przypisana kilku czynnikom, w tym rozmiarowi cząstek, ich rozkładowi, adhezji międzyskładnikowej oraz możliwej aglomeracji. W przeciwieństwie do LNP, KLP o większym rozmiarach i mniejszym stosunku powierzchni do objętości prowadzi do lepszego rozkładu i mniejszej tendencji do aglomeracji w matrycy PBAT. Dlatego w niskich stężeniach KLP mogą być bardziej jednorodnie rozproszone w matrycy, co zapewnia wzmocnienie i nieznacznie poprawia wytrzymałość na rozciąganie poprzez ograniczenie ruchliwości łańcuchów polimerowych i zwiększenie transferu naprężeń. LNP tworzą silne agregaty z powodu silnej siły adhezji między nanocząstkami, co działa jako punkt koncentracji naprężeń i zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie

nanokompozytów. Zbadałam właściwości termiczne nanokompozytów LNP-PBAT, takie jak wpływ LNP na T_g , krystaliczność, temperaturę topnienia, moduł zachowawczy, moduł stratności oraz stabilność termiczną PBAT.

Stwierdziłam po raz pierwszy również wpływ LNP na właściwości przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe i przeciwwirusowe PBAT, biorąc pod uwagę naturalne właściwości biologiczne ligniny, takie jak jej aktywność przeciwutleniająca, właściwości przeciwdrobnoustrojowe i przeciwwirusowe, i badałam w jaki sposób redukcja rozmiarów ligniny wpływa na te właściwości. Dlatego w tym badaniu oceniłam aktywność przeciwutleniającą (AOA) LP, LNP i ich kompozytów z PBAT przy użyciu testów ABTS•+ i FRAP. Wyniki wskazały na różne poziomy aktywności przeciwutleniającej z powodu różnic w reaktywności i specyfice substratu wśród przeciwutleniaczy. Zarówno LP, jak i LNP skutecznie wychwytywały rodniki ABTS•+ i wykazywały zdolność redukcji żelaza w teście FRAP, przy czym AOA była zależna od stężenia. Nasze obserwacje ujawniają, że chociaż AOA LNP nie przewyższała znacząco AOA czystych LP, to całkowita aktywność przeciwutleniająca LP i LNP była porównywalna. Kwasowa hydroliza LP prowadziła do redukcji rozmiaru cząstek i masy cząsteczkowej, zwiększając dostępność grup hydroksylowych fenolowych, co przyczyniło się do wyższej AOA w próbkach LNP. W nanokompozytach PBAT inherentna AOA była minimalna, ale wzrastała wraz z dodaniem LNP, zgodnie z trendem zależnym od stężenia. Wzrost ten w AOA prawdopodobnie związany jest z dostępnością LNP na powierzchni filmów PBAT, które mogą wchodzić w interakcje z wolnymi rodnikami i potencjalnie być uwalniane w zastosowaniach takich jak opakowania żywności. W porównaniu do innych badań, nasz system PBAT/LNP wykazał lepszą sprawność przeciwutleniającą.

Aby ocenić aktywność przeciwdrobnoustrojową, oceniłam czyste LP i LNP, wraz z filmami nanokompozytowymi, w odniesieniu do Gram-dodatniego *S. aureus* oraz Gram-ujemnych *E. coli* i *P. aeruginosa*. Te bakterie są istotne w powodowaniu infekcji medycznych lub związanych z żywnością, przy użyciu testu hamowania strefy. Nie wykryłam żadnej aktywności przeciwdrobnoustrojowej w żadnej z próbek, co zostało potwierdzone brakiem strefy zahamowania wokół badanych materiałów. Niemniej jednak, zaobserwowałam brak wzrostu bakterii bezpośrednio pod materiałami, co sugeruje ich działanie bakteriostatyczne. Dodatkowo omówiłam i zaproponowałam mechanizm przeciwdrobnoustrojowy LP/LNP jako indywidualnych składników w matrycy filmu polimerowego. Stwierdziłam również, że zarówno LP, jak i LNP są nietoksyczne w żadnej z badanych linii komórkowych.

W naszym projekcie, podobnie jak w przypadku właściwości przeciwutleniających, po raz pierwszy oceniano aktywność przeciwwirusową LP, LNP oraz ich odpowiadających kompozytów PBAT wobec dwóch różnych wirusów otoczkowych, HCoV229e i HSV-1, w komórkach MRC-5 i HaCaT, odpowiednio. Odkryłam, że zarówno LP, jak i LNP wykazały znaczną aktywność przeciwwirusową przeciwko HSV-1 i HCoV2293. Jednak aktywność przeciwwirusowa LNP była zależna od stężenia, a

rozmiar LP (mikro i nano) nie odgrywał widocznej roli w aktywności przeciwwirusowej. Żaden z kompozytów LNP/PBAT nie wykazał aktywności przeciwwirusowej, ponieważ LNP są osadzone w masie matrycy polimerowej, co ogranicza ich dostępność do wiązania się z wirusami. Zaproponowano prawdopodobny mechanizm przeciwwirusowy LP i LNP.

Streszczenie

Jak przedstawiono w tym cyklu publikacji, moja praca koncentruje się na ekstrakcji, modyfikacji i zastosowaniu materiałów opartych na nanocelulozie, ligninie i nanoligninie, z naciskiem na poprawę ich właściwości chemicznych, fizycznych, termicznych i biologicznych. Cele te są realizowane poprzez wykorzystanie ekologicznych technik ekstrakcji, modyfikację powierzchni i innowacyjne metody wytwarzania kompozytów. Poprzez te badania udowodniłam, że można:

- Osiągnąć zieloną i zrównoważoną ekstrakcję nanocelulozy o wysokiej krystaliczności i stabilności termicznej z nowych źródeł odpadów rolniczych, unikając wad tradycyjnej hydrolizy kwasowej (Artykuły H1-H3)
- Opracować mocniejsze, trwalsze biokompozyty i nanokompozyty o dostosowanych właściwościach mechanicznych, termicznych i odporności na wodę, wykorzystując nanocelulozę jako wzmocnienia w biodegradowalnych matrycach (Artykuły H4, H9-H11)
- Stworzyć funkcjonalne aerogeły o dostosowanej strukturze porów i zwiększonej pojemności adsorpcyjnej do wychwytywania CO₂ poprzez modyfikację powierzchni nanocelulozy (Artykuły H5-H6, H9)
- Wytwarzać hydrofobowo-oleofilowe aerogeły o poprawionej wielokrotnej użyteczności i integralności strukturalnej do zastosowań środowiskowych, takich jak absorpcja oleju (Artykuł H7)
- Umożliwić systemy dostarczania związków bioaktywnych poprzez modyfikację nanocelulozy do wiązania i stabilizacji hydrofobowych związków, takich jak kurkumina (Artykuł H8)
- Opracować kompozyty polimerowe i nanokompozyty poprzez integrację cząsteczek ligniny kraft (KLP) i nanocząsteczek ligniny (LNP) w biodegradowalnych matrycach, poprawiając właściwości mechaniczne, termiczne i bioaktywne (Artykuły H10-H11).

Prace te przyczyniły się zarówno do rozwoju podstawowych badań nad funkcjonalizacją materiałów lignocelulozowych, jak i do badań stosowanych w zakresie zrównoważonego rozwoju środowiska, zastosowań biomedycznych i innowacji w nauce o materiałach, podkreślając wielofunkcyjność nanocelulozy, ligniny i nanoligniny.

5. Prezentacja Znaczącej Działalności Naukowej lub Artystycznej Prowadzonej w Więcej Niż Jednej Uczelni, Instytucji Naukowej lub Kultury, w Szczególności w Instytucjach Zagranicznych

Nawiązałem silne współprace z naukowcami zarówno w kraju, jak i za granicą. Na poziomie krajowym ściśle współpracuję z Katedrą Ekofizjologii Roślin na Wydziale Biologii i Ochrony Środowiska

Uniwersytetu Łódzkiego oraz z Katedrą Nanobiologii i Biomateriałów w Wojskowym Instytucie Higieny i Epidemiologii w Warszawie. Wspólnie ubiegaliśmy się o granty NCN (OPUS i SONATA BIS), które, choć jeszcze bez sukcesów, znacząco wzmocniły nasze partnerstwo. Przykładem tej współpracy jest nasza pierwsza wspólna publikacja, praca [H11], w której projekt realizowany był w trzech instytucjach.

Na arenie międzynarodowej moja współpraca z badaczami z UKM trwa od czasu mojego ukończenia studiów. Partnerstwo to obejmuje współrealizowanie projektów, współprowadzenie prac magisterskich oraz współautorstwo artykułów badawczych i przeglądowych, na przykład prac H5-H8, które zostały omówione w poprzedniej sekcji. Krótko mówiąc, projekty dotyczyły ekstrakcji CNC z włókien naturalnych, ich modyfikacji powierzchniowej oraz badania ich potencjalnych nowych zastosowań, takich jak pochłaniacze CO₂, pochłaniacze oleju oraz dostarczanie substancji bioaktywnych. Dodatkowo opublikowaliśmy wysoko cytowaną pracę przeglądową na temat naturalnej degradacji mieszanin polilaktydowych w czasopiśmie Q1 [36], który przyciągnął znaczną uwagę, [uzyskując 132 cytowań w GS od grudnia 2024](#). Współautorstwo dotyczyło również rozdziału książki na temat modyfikacji powierzchni biopolimerów w "Handbook of Biopolymers" [37]. Kolejne międzynarodowe współprace obejmują moją pracę z Katedrą Chemii w Newman College oraz Szkołą Nauk Chemicznych na Uniwersytecie Mahatmy Gandhiego, która rozpoczęła się w 2019 roku. W 2021 roku sformalizowaliśmy tę współpracę podpisując Memorandum of Understanding (MOU) między CBMM PAN a Newman College. Od tego czasu wspólnie nadzorowaliśmy trzech doktorantów oraz opublikowaliśmy cztery prace badawcze [38-41], cztery prace przeglądowe [42-45] oraz dwa rozdziały książek [37-46]. Dodatkowo, wraz z Dr. Jose, Prof. Thomasem i Prof. Ahmad (UKM), redagowaliśmy numery specjalne w czasopismach Polymers (MDPI) i Journal of Composite Science (MDPI). Utrzymuję również aktywną współpracę ze Szkołą Inżynierii Mechanicznej w Vellore Institute of Technology, gdzie wspólnie z Dr. Sandeepem Ahankari napisaliśmy rozdział książki oraz dwa dobrze przyjęte artykuły przeglądowe w International Journal of Biological Macromolecules (IF 7.7) [47] oraz ACS NANO (IF 15.8) [48]. Oba artykuły zdobyły znaczną uwagę na całym świecie, co zaowocowało przyznaniem mi nagrody za "Najczęściej Cytowany Artykuł Przeglądowy" w CBMM w 2023 roku. Ponadto współpracuję z Prof. Dr. Mehdi Jonoobi z Katedry Nauki i Technologii Drewna i Papieru na Uniwersytecie Teherańskim, gdzie opublikowaliśmy dwie prace przeglądowe na temat ostatnich osiągnięć w aerożelach na bazie nanocelulozy do oczyszczania powietrza i wody [49, 50]. Dodatkowo, moja współpraca z Dr. Partha Palit z Katedry Nauk Farmaceutycznych na Uniwersytecie Assam doprowadziła do dwóch prac przeglądowych na temat nowo pojawiających się trendów w naturalnych egzopolisacharydach oraz kwantowy kropek węglowych w polimerowych nanokompozytach do zastosowań w dostarczaniu leków [51, 52].

W ramach moich międzynarodowych działań w 2022 roku zostałam zaproszona przez Prof. Dr. Marino Lavorgna, kierownika Instytutu Polimerów, Kompozytów i Biomateriałów (IPCB-CNR) w Lecco,

Włochy, oraz Dr. Pierfrancesco Cerruti, starszego badacza w IPCB-CNR, do odwiedzenia ich laboratorium w ramach Programu Mobilności Krótkoterminowej (STM) Narodowej Rady Badań (CNR) oraz Polskiej Akademii Nauk (PAN). Podczas mojej wizyty opracowaliśmy plan badawczy dla wspólnego projektu w współpracy z ekspertami i badaczami IPCB. Moje zadania obejmowały projektowanie warunków reakcji i formułowanie bio-nanokompozytów, wybór prekursorów i surowców oraz przeprowadzanie eksperymentów laboratoryjnych w celu wytworzenia roztworu powłokowego polimeru (na bazie chitozanu i nanocelulozy), mającego na celu poprawę właściwości barierowych biodegradowalnych tworzyw sztucznych. Przeprowadziłam również wstępne testy przy użyciu natryskiwacza ultradźwiękowego. Wizytę zakończono sesją, na której omówiono wyniki wstępnych eksperymentów laboratoryjnych i zaplanowano zakończenie projektu, a także zarysowano dalsze wspólne działania badawcze między obiema instytucjami.

6. Prezentacja Osiągnięć Dydaktycznych i Organizacyjnych Oraz Osiągnięć w Dziedzinie Popularyzacji Nauki Lub Sztuki

Zgodnie z moim zaangażowaniem w popularyzację nauki i edukację, aktywnie angażowałam się w szereg inicjatyw akademickich i publicznych. Wystąpiłam na Festiwalu Nauki w Łodzi, wygłaszając wykład na temat biomimikry, aby zainspirować studentów spostrzeżeniami zaczerpniętymi z innowacyjnych projektów natury. Ponadto wygłosiłam specjalistyczny wykład na temat nanocelulozy dla studentów studiów licencjackich na Politechnice, przekazując im podstawową wiedzę na temat zaawansowanych nanomateriałów. Moje zaangażowanie w wymianę naukową obejmuje konferencje międzynarodowe, na których przedstawiłam swoje badania i znacząco przyczyniłam się do organizacji seminariów, warsztatów i konferencji, wspierając współpracę w ramach globalnej społeczności akademickiej. Mój wkład organizacyjny obejmuje zarówno Malesję, jak i Polskę, wspierając wydarzenia międzynarodowe, które łączą idee naukowe ponad granicami.

Obecnie jestem promotorem pomocniczym w Szkole Doktorskiej BioMedChem (Uniwersytet Łódzki i placówki PAN w Łodzi) oraz współpromotorem trzech doktorantów zagranicą, a wcześniej współpromotorem studenta studiów magisterskich, który ukończył studia w 2021 r. Ponadto nadzorowałam dwóch studentów stażystów. Szczegółowe informacje na temat moich osiągnięć znajdują się w **Załączniku 5** (Lista osiągnięć naukowych, sekcje 4.2, 4.3, 4.4).

7. Oprócz Informacji Określonych w Punktach 1-6 Powyżej, Wnioskodawca Może Dołączyć Inne Informacje Dotyczące Swojej Kariery Zawodowej, Które Uznaje Za Ważne.

7.1. Przebieg pracy badawczej przed uzyskaniem stopnia doktora:

Rozpoczęłam studia licencjackie z zakresu chemii stosowanej w Katedrze Chemii Inżynierskiej na Islamskim Uniwersytecie Azad w Gachsaran w 1999 roku, po uzyskaniu dyplomu z zakresu nauk

eksperymentalnych i zdaniu egzaminu wstępnego na uniwersytet w tym samym roku. Latem 2002 roku odbyłam miesięczny staż w Irańskim Centrum Badań nad Krewetkami, gdzie pracowałam nad projektem mającym na celu pomiar ilości metali ciężkich w rybach i krewetkach z Zatoki Perskiej. Projekt ten wymagał intensywnej chemii ekstrakcyjnej, chemii analitycznej oraz analizy statystycznej.

Następnie ukończyłam studia z oceną Excellence w 2003 r., uzyskując oceny wyższe niż 50% całkowitej oceny i zajmując pierwsze miejsce wśród wszystkich studentów tego samego roku ukończenia studiów. Dzięki temu osiągnięciu byłam jedyną osobą, która otrzymała pierwszeństwo przed innymi kandydatami na egzaminie wstępnym na studia magisterskie, które podjęłam natychmiast po ukończeniu studiów licencjackich. Pracowałam jako kierownik ds. kontroli jakości w fabryce medycznego alkoholu etylowego Jahan Khorma Medical w Buszehr w Iranie od 2003 do 2004 r. Zrezygnowałam z tego stanowiska, aby kontynuować studia magisterskie w Gachsaran. Od 2004 do 2007 r. byłam studentem studiów magisterskich na Wydziale Inżynierii Chemicznej na Uniwersytecie Islamskim Azad w Gachsaran, specjalizującym się w chemii organicznej. Ukończyłam pracę magisterską pod opieką prof. dr. Bahadora Karamiego (Uniwersytet Yasouj, Yasouj, Iran) i współnadzorem prof. dr. Khodabakhsha Niknama (Uniwersytet Zatoki Perskiej, Bushehr, Iran). Moja praca nosiła tytuł "Deprotection of Oximes, Hydrazones, and Semicarbazones in the Presence of Tungstate Sulfuric Acid (TSA) and Permanganian and Sodium Nitrite Oxidants and Aldol Condensation Reaction in the Presence of TSA".

W tych badaniach deprotekcję oksymów, hydrazonów, semikarbazonów, tiosemikarbazonów i ich konwersję do związków karbonylowych przeprowadzono przy użyciu heterogenicznego układu TSA i azotynu sodu w obecności rozpuszczalnika dichlorometanu w temperaturze pokojowej, a także w obecności TSA i nadmanganianu w rozpuszczalniku dichlorometanie i w warunkach refluksu. Jedną z istotnych zalet tej metody była redukcja czasu reakcji, wysoka czystość produktów, doskonała wydajność oraz możliwość odzysku i ponownego użycia stałego kwasu jako katalizatora, co sprawia, że metoda ta jest czystsza w porównaniu do innych. Reakcja kondensacji aldolowej również została pomyślnie przeprowadzona z użyciem TSA i podłoża żelu krzemionkowego w specjalnej rurce w temperaturze 120 °C. Przetestowano ponad 12 rodzajów oksymów, 7 rodzajów hydrazonów, 7 rodzajów hydrazonów fenylowych, 5 rodzajów semikarbazonów i 10 reakcji kondensacji aldolowej. Zastosowanie kwasu tungstanowego jako nowego stałego kwasu w tych dwóch metodach, w porównaniu do podobnych metod, skróciło czas reakcji i zwiększyło wydajność produktów. Stworzyło także heterogeniczne środowisko dla reakcji, co ułatwiło fazy oczyszczania i pracy. Wyniki pokazały, że ten kwas można odzyskać i używać wielokrotnie bez utraty jego aktywności kwasowej. Ukończyłam studia magisterskie w 2007 roku, uzyskując GPA 17,48 na 20.

W trakcie studiów magisterskich pracowałam również jako nauczyciel chemii w Liceum Behesht Aeen w Bushehr w Iranie (2004–2006). Po ukończeniu studiów w 2007 roku zostałam wykładowcą w Al Zahra Vocational-Technical College (2007–2008) w Bushehr, Iran, ucząc chemii organicznej i

laboratoriów chemii organicznej. Równocześnie, na Uniwersytecie Azad w Alishahr w Bushehr, Iran, prowadziłam zajęcia z zakresu oczyszczania wody i praktyk laboratoryjnych, a także z chemii polimerów i barwników.

W październiku 2008 roku przeprowadziłam się do Malezji i zapisałam się do Taylor's University College, aby uczyć się języka angielskiego. Zmotywowany do kontynuacji nauki na poziomie doktoranckim, w czerwcu 2009 roku zapisałam się jako student doktorancki na Wydziale Nauki i Technologii, w Szkole Nauk Chemicznych i Technologii Żywności na UKM, Narodowym Uniwersytecie Malezji. Moim opiekunem był prof. dr Ishak Ahmad, a współopiekunami byli prof. dr Ibrahim Abdullah i prof. dr Alain Dufresne (Grenoble, Francja). Moja praca doktorska nosiła tytuł: *„Opracowanie nanokompozytowego poliestru/kauczuku naturalnego w postaci cieczy wzmocnionego nanokryształami celulozy z włókien kenafowych.”*

Jednym z głównych celów projektu było wydobycie nanokryształów celulozy (CNC) z krótkich włókien kenafowych za pomocą hydrolizy kwasowej. Warto zauważyć, że dekadę temu nanoceluloza była uważana za nowy nanomateriał do badań, nie była szeroko znana, a techniki izolacji były dość trudne. Wyniki te zostały opublikowane w 2012 roku w czasopiśmie *Cellulose* (Springer), który jest czasopismem Q1, i zyskały znaczne zainteresowanie naukowców, z ponad 918 cytowań ([według GS w listopadzie 2024 roku](#)). Jednocześnie byłam zaangażowana w inne podobne projekty dotyczące wydobycia CNC z różnych rodzajów włókien naturalnych, takich jak liście Mengkuang (*Pandanus tectorius*) [53]. Stwierdziłmy, że stabilność termiczna włókien wzrosła po obróbce alkalicznej, wybieleniu i hydrolizie kwasowej. Artykuł ten został opublikowany w czasopiśmie *Carbohydrate Polymers* (Elsevier), które również jest czasopismem Q1, i zyskał światowe uznanie, uzyskując 590 cytowań ([według GS w listopadzie 2024 roku](#)). Uzyskane CNC były następnie wykorzystywane jako wzmocnienie w nieskondensowanym poliestrze oraz w mieszkankach UPR z dwoma różnymi rodzajami cieczy naturalnego kauczuku.

Dodatkowo, w trakcie moich studiów doktoranckich uczestniczyłam w siedmiu międzynarodowych konferencjach jako prelegent i pomyślnie opublikowałam rozdział książki zatytułowany "Wydobycie nanowiskierów celulozowych z włókna kenafowego" w książce *Natural Polymers, Biopolymers, Biomaterials, and Their Composites, Blend, and IPNs* [54]. Przyznano mi dwa wewnętrzne mini-granty na uczestnictwo w konferencjach, a także zdobyłam nagrodę za najlepszego prezentera studenckiego na 8. Azjatycko-Australijskiej Konferencji na temat Materiałów Kompozytowych (ACCM-8) ([Załącznik 8](#)). Pomagałam również w nadzorowaniu studentów magisterskich pod kierunkiem prof. dr. Ishaka Ahmada. Uczestniczyłam w różnych warsztatach naukowych, aby poszerzyć swoją wiedzę w dziedzinie kompozytów polimerowych, nanomateriałów i ich charakteryzacji. Aktywnie uczestniczyłam także jako członek podkomitetu organizacyjnego w serii Malezyjskich Międzynarodowych Konferencji Polimerowych (MPIC) organizowanych przez Centrum Badań

Polimerowych (PORC) na Wydziale Nauki i Technologii. 29 października 2013 roku ukończyłam studia doktoranckie i uzyskałam stopień doktora chemii.

7.2. Przebieg pracy badawczej po uzyskaniu stopnia doktora:

Od 1 lutego 2014 roku zostałam badaczem podoktorskim w tej samej grupie badawczej pod kierunkiem prof. Ishaka Ahmada. Kontynuowałam pracę jako asystent prowadzącego, a moje zainteresowania badawcze nadal koncentrowały się na kompozytach i materiałach na bazie nanocelulozy. Jednakże, zmieniłam swoje zainteresowania na modyfikację powierzchni nanocelulozy oraz produkcję aerogeli, badając ich zastosowania w oczyszczaniu wody, systemach wychwytywania CO₂ i dostarczaniu leków.

Z powodu mojej wiedzy w zakresie ekstrakcji i modyfikacji nanocelulozy, zostałam zaproszona do współpracy z grupami badawczymi dr hab. Rizafizah Othaman oraz dr hab. Surial Ramli. Razem z dr Othaman opracowaliśmy projekt zatytułowany „Opracowanie ekologicznego funkcjonalizowanego nanokryształu celulozy (NCC) - inteligentnego materiału do wychwytywania dwutlenku węgla (CO₂)”, który otrzymał dofinansowanie od Ministerstwa Nauki, Technologii i Innowacji (MOSTI). W tym projekcie pełniłam funkcję współbadacza i byłam odpowiedzialna za pomoc dr Othaman w nadzorowaniu studentów magisterskich, projektowaniu metodologii ekstrakcji CNC z włókien pustych owoców palmy olejowej oraz modyfikacji powierzchni, a także wspieraniu studentów w produkcji aerogeli. Wyniki tego projektu zostały opublikowane w czasopiśmie Q1, jak wskazano w [H5] i [H6]. Dodatkowo projekt otrzymał Srebrny Medal na Expo Inwencji, Innowacji i Technologii SIRIM (SI²TE) w 2017 roku (**Załącznik 9**). Współpracując z dr Surial Ramli, pracowałam nad modyfikacją powierzchni i hydrofobizacją nanocelulozy wydobytej z włókna kenafowego, mając na celu związanie hydrofobowej kurkuminy z nanocelulozą i produkcję nanocelulozy na bazie mikroemulsji (odniesione w [H8] i [29]). W 2016 roku, wraz z prof. Ahmadem, przygotowałam wspólną propozycję badawczą pt. *„Zielone hydrofobowe i oleofilowe aerozele nanocelulozowe do wchłaniania oleju,”* która została sfinansowana przez Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) w ramach programu GUP Uniwersytetu. Wyniki i efekty tego projektu zostały opublikowane w [H7].

W tym okresie opublikowałam kilka artykułów na temat wpływu dwóch różnych typów ciekłych kauczuków naturalnych na właściwości nienasyconej żywicy poliestrowej (UPR) (układ binarny), a także synergistycznego efektu CNC i ciekłych kauczuków naturalnych na właściwości UPR (układ trójskładnikowy). Ponadto badałam wpływ modyfikacji powierzchni CNC na właściwości kompozytów dwuskładnikowych i trójskładnikowych. Wyniki te zostały opublikowane w prestiżowych czasopiśmie, takich jak Polymer (Q1, IF=4,9) [17, 19], Journal of Applied Polymer Science (Q2, IF=2,7) [46] i Industrial Crops and Products (Q1, IF=5,6) [55]. Publikacje te przyciągnęły znaczną uwagę na całym świecie (**Załącznik 5, Tabela 8**). Oprócz tych publikacji, przyczyniłam się do pięciu rozdziałów książek i prezentowałam swoje badania na licznych międzynarodowych konferencjach w

Kanadzie, Francji, Stanach Zjednoczonych i Malezji, gdzie uczestniczyłem zarówno jako autor plakatów, jak i prelegent.

Moja praca nad ekstrakcją, modyfikacją i zastosowaniem nanocelulozy w różnych dziedzinach zainspirowała mnie do pisania prac przeglądowych na te tematy, które zyskały znaczną uwagę na całym świecie ([H1], [H9], [56]). To uznanie doprowadziło do mojego zaangażowania w redagowanie obszernego podręcznika na temat nanocelulozy i jej kompozytów. Ta dwutomowa książka, wydana przez Wiley w 2017 r., obejmuje wszystkie główne aspekty nanocelulozy i nanokompozytów celulozowych w 24 rozdziałach. Podręcznik był wspólnym wysiłkiem 55 ekspertów i otrzymał wysokie noty od dr Roberta J. Moona, światowego pioniera w dziedzinie materiałów nanocelulozowych z Forest Products Laboratory, USFS i członka Renewable Bioproducts Institute w Georgia Institute of Technology. Dr Moon, który w 2017 r. pełnił również funkcję przewodniczącego działu nanotechnologii w Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), uznał podręcznik za cenne źródło wiedzy w tej dziedzinie (proszę zapoznać się z Załącznikiem 10, okładką podręcznika).

W listopadzie 2017 roku przeniósłem się do Polski, aby rozpocząć nowy rozdział w mojej karierze naukowej jako adiunkt w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk (CBMM PAN). Swoją kadencję rozpoczęłam od pracy nad projektem zatytułowanym „Kawitacja w nanokompozytach polimerowych”, prowadzonym przez prof. Andrzeja Galeskiego i finansowanym przez NCN. Wyniki tego projektu z moim współautorstwem zostały opublikowane w dwóch prestiżowych czasopismach: Polymer [H10] oraz Composite Science and Technology (Q1, IF=9.8) [57], jak wcześniej wspomniano.

Oprócz tego, brałam udział w kilku krajowych i międzynarodowych współpracach, opisanych w **sekcjach 5 i 6**, kontynuując swoje badania nad nanocelulozą, ligniną i materiałami na bazie nanoligniny. W 2019 roku, wspólnie z prof. dr hab. Andrzejem Galeskim, prof. dr hab. Słomkowskim oraz prof. dr hab. Teresą Basińską, zorganizowaliśmy Międzynarodową Konferencję na temat Dokładnie Ustrukturyzowanych Materiałów Polimerowych, która przyciągnęła znaczną uwagę badaczy z Europy i Azji. Aktywnie uczestniczyłam również w kilku międzynarodowych konferencjach, prezentując swoje osiągnięcia badawcze szczegółowo opisane w H1-H11. Miałam zaszczyt być głównym mówcą na Międzynarodowej Konferencji na temat Najnowszych Trendów w Materiałach Hybrydowych w Indiach w 2021 roku, gdzie zaprezentowałam najnowsze osiągnięcia w zakresie materiałów na bazie nanocelulozy.

Od 2020 roku jestem członkiem redakcji czasopisma Journal of Composite Science oraz rady recenzentów czasopisma Polymers (oba MDPI). Pełniłam także funkcję członka redakcji Current Engineering Letters i Reviews w Bentham Science od 2021 roku oraz Journal of Sustainable Polymer and Energy (SCIEPublish) od 2022 roku. Dodatkowo miałam przyjemność być gościnnym redaktorem dwóch specjalnych wydań: „Nanokompozyty Polysacharydowe: Przygotowanie, Właściwości i

Zastosowanie” w Journal of Composite Science oraz „Materiały Polimerowe na Bazie Chitozanu, Celulozy i Ich Pochodnych” w Polymers. Te role znacząco przyczyniły się do mojego rozwoju zawodowego, pozwalając mi na współpracę z wiodącymi naukowcami, poprawę moich umiejętności recenzji oraz kształtowanie dyskursu akademickiego w mojej dziedzinie. Doświadczenia redakcyjne wzbogaciły mój profil naukowy, poprawiły moje umiejętności krytycznej oceny i umiejscowiły mnie jako uznanego autorytet w mojej dyscyplinie, demonstrując znaczenie liderstwa akademickiego w rozwoju kariery i znaczącym wkładzie w społeczność akademicką. Dodatkowo aktywnie recenzuję prace na zaproszenie redaktorów wiodących czasopism w tej dziedzinie, w tym Carbohydrate Polymers, Cellulose i International Journal of Biological Macromolecules.

Miałam zaszczyt otrzymać liczne nagrody za najczęściej cytowane prace przeglądowe i badawcze wśród wszystkich badaczy w CBMM PAN, co odzwierciedla znaczący wpływ mojej pracy w społeczności naukowej. Te nagrody, przyznawane od 2016 do 2024 roku, podkreślają ciągłą aktualność i wpływ moich badań na przestrzeni lat. Uznanie za posiadanie najczęściej cytowane prace podkreśla wysoką jakość i szeroki zasięg mojego wkładu, potwierdzając moją rolę jako wiodącego badacza w mojej dziedzinie (**Załącznik 11**).

- Nagroda za najczęściej cytowaną pracę przeglądową i badawczą w CBMM PAN w latach 2020–2024 (Recent developments in nanocellulose-based aerogels in thermal applications, ACS Nano, 2021, 15, 3, 3849-3874)
- Nagroda za najczęściej cytowaną pracę badawczą w CBMM PAN w latach 2020–2024 (PBAT green composites: effect of kraft lignin particles on the morphological, thermal, crystalline, macro and micromechanical properties, Polymer, 2020, 203, 122748)
- Nagroda za najczęściej cytowaną pracę przeglądową w CBMM PAN w latach 2018–2021 (Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers, thermoplastic polymers, and porous nanocomposites, Progress in Polymer Science, 2018, 87, 197-2)
- Nagroda za najczęściej cytowaną pracę przeglądową w CBMM PAN w latach 2017–2020 (Advances in cellulose nanomaterials, Cellulose, 2018, 25, 4, 2151-2189)
- Nagroda za najczęściej cytowaną pracę przeglądową w CBMM PAN w latach 2016–2019 (Recent developments on nanocellulose reinforced polymers nanocomposites: A review, Polymer, 2017, 132, 368-393)

Jestem również dumna z tego, że znalazłam się wśród „Światowego rankingu 2% najlepszych naukowców – Ustandaryzowane wskaźniki cytowań” w dziedzinie chemii, w poddziedzinie polimerów i materiałów, na podstawie moich znaczących wkładów i wpływu moich badań. Moje rankingi konsekwentnie plasowały mnie wśród najlepszych naukowców na świecie, zajmując odpowiednio 1271 miejsce spośród 80670 w 2020 roku, 1233 miejsce spośród 100162 w 2021 roku, 919 miejsce spośród

103159 w 2022 roku, 1039 miejsce spośród 108979 w 2023 roku oraz 862 miejsce spośród 116445 w 2024 roku. Te osiągnięcia odzwierciedlają wysoką renomę, jaką cieszy się moja praca w społeczności naukowej, oraz podkreślają wpływ moich badań na rozwój dziedziny biopolimerów. Te liczby są oparte o bazę danych Elsevier pod tym linkiem:

<https://elsevier.digitalcommonsdata.com/datasets/btchxktzyw/7>

Chemia, Materiały polimerowe		
Afilacja: Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)		
Rok	Ranga (Polimer)	Łączna liczba autorów
2020	1271	80670
Chemia, Materiały polimerowe		
Afilacja: Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk		
Rok	Ranga (Polimer)	Łączna liczba autorów
2021	1233	100162
2022	919	103159
2023	1039	108979
2024	862	116445

Dodatkowo mam zaszczyt zajmować 80. miejsce na liście „Top 500 Autorów według Wyników Naukowych” w Polskiej Akademii Nauk za lata 2018–2024. Biorąc pod uwagę liczbę „Cytowań (C)”, zajmuję 5. miejsce (1193 C) na liście, a w kategorii „Cytowanie na publikację (CPP)” jestem na 1. miejscu (51,9 CPP) na liście. Uważam, że to wyróżnienie odzwierciedla moje stałe zaangażowanie w badania oraz wkład w moją dziedzinę przez te lata. Bycie uznawanym wśród najlepszych naukowców w tak prestiżowej instytucji podkreśla wpływ i jakość mojej pracy, wzmacniając moje zaangażowanie w rozwijanie wiedzy w dziedzinie mojej aktywności.



.....
(Podpis wnioskodawcy)

8. Wykaz skrótów

Skrót	Znaczenie
ABTS	2,2'-azyno-bis(3-ethylbenzotiazolina-6-sulfonowy kwas
AEAPDMS	3-(2-aminoetylamino) propyl-dimoksy-metylo-silan
AGUs	Jednostki anhydroglukozy
AOA	Zdolność antyoksydacyjna
APTMS	Aminosilany—3-(aminopropyl) trimetoksy-silan
BE%	Efektywność wiązania
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BJH	Barrett-Joyner-Halenda
C	Cytowania
CBMM PAN	Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk
CNCs	Nanokrystaliczna celuloza
CNFs	Nanowłókna celulozowe
CO ₂	Dwutlenek węgla
CPP	Cytowanie na publikację
CTAB	Bromek cetyltrimetyloamoniowy
DET3	N-(3-trimetoksy-sylilopropyl) dietylenotriamina
DS	Stopień podstawienia
EC	Łodygi Elettaria cardamomum
EFB	Puste kiście owoców
FRAP	Test zdolności redukcji antyoksydacyjnej żelaza
FTIR	Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera
GS	Google Scholar
GT	Grewia Tiliifolia
H ₂ C ₂ O ₄	Kwas szczawiowy
H ₂ SO ₄	Kwas siarkowy
HCl	Kwas solny
IF ₂₀₂₄	Wskaźnik wpływu
IF _{5years}	5-letni wskaźnik wpływu
IF _{YOP}	Wskaźnik wpływu z roku publikacji artykułu
kDa	Kilodalton
KLP	Cząstki ligniny kraftowej
KMnO ₄	Permanganian potasu
LCA	Ocena cyklu życia
LNPs	Nanocząstki ligniny
LP	Cząstki ligniny
MEiN	Punkty przyznane czasopismu przez Ministerstwo Edukacji i Nauki
mM	Milimol
MOFs	Metalowo-organiczne ramy
MOU	Memorandum porozumienia
MTMS	Metylotrimoksy-silan
mV	Milivolty
N	Azot

NaClO ₂	Podchloryn sodu
NaOH	Wodorotlenek sodu
NCN	Narodowe Centrum Nauki (National Science Centre)
PORCE	Centrum Badań nad Polimerami
S	Scopus
SAXS	Rozpraszanie rentgenowskie pod małym kątem
S _{BET}	Powierzchnia
SBs	Kompozyty na bazie skrobi
SEM	Mikroskop elektronowy skaningowy
TEM	Mikroskop elektronowy transmisyjny
T _g	Temperatura przejścia szklistego
TGA-DTG	Analiza termogravimetryczna – Różnicowa analiza termogravimetryczna
TSA	Kwas tungstanowy
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
UV	Ultrafiolet
V _t	Objętość porów
WoS	Web of Science
XRD	Dyfrakcja rentgenowska

9. Odniesienia

- [H1] Kargarzadeh, H., Mariano, M., Huang, J., Lin, N., Ahmad, I., Dufresne, A., Thomas, S., Advances in cellulose nanomaterials, Cellulose (2018) 25: 2151-2189. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1723-5>
- [H2] Cherian, R. M., Varghese, R. T., Antony, T., Malhotra, A., Kargarzadeh, H., Chauhan, S. R. Chauhan, A., Chirayil, C. J. Thomas, T. Non-cytotoxic, high crystalline and thermal stability derived from a novel agromass of Elettaria cardamomum, using a soft and benign mild oxalic acid hydrolysis, International Journal of Biological Macromolecule (2023) 253, 126571. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126571>
- [H3] Varghese, R. T., Cherian, R. M., Antony, T., Chirayil, C. J., Kargarzadeh, H., Malhotra, A., Chauhan, A., Thomas, S. Thermally stable, highly crystalline cellulose nanofibrils isolated from the lignocellulosic biomass of G. Tiliifolia plant barks by a facile mild organic acid hydrolysis, Biomass Conversion and Biorefinery (2023), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05049-0>
- [H4] Kargarzadeh, H., Johar, N., Ahmad, I. Starch biocomposite film reinforced by multiscale rice husk fibre, Composites Science and Technology (2017) 151: 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.08.018>
- [H5] Mohd, N. H., Kargarzadeh, H., Ramli, S., Ahmad, I., Yarmo, M. A., Othaman, R. Effect of aminosilane modification on nanocrystalline cellulose properties, Journal of Nanomaterials, 2016 (2016), 1-8. <https://doi.org/10.1155/2016/4804271>
- [H6] Mohd, N. H., Kargazadeh, H. Miyamoto, M., Uemiyac, S., Sharer, N., Baharum, A., Peng, T. L., Ahmad, I., Yarmo, M. A., Othaman, R. Aminosilanes grafted nanocrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunch aerogel for carbon dioxide capture, Journal of Materials Research and Technology (2021) 13, 2287-2296. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.018>

- [H7] Rosli, N. A., Khairudin, F. A., Kargarzadeh, H., Othman, R., Ahmad, I. Hydrophobic-oleophilic gamma-irradiated modified cellulose nanocrystal/gelatin aerogel for oil absorption, *International Journal of Biological Macromolecule* (2022) 219, 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.191>
- [H8] Zainuddin, N., Ahmad, I., Kargarzadeh, H., Ramli, S. Hydrophobic kenaf nanocrystalline cellulose for the binding of curcumin, *Carbohydrate Polymers* (2016) 163: 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.01.036>
- [H9] Kargarzadeh, H. Huang, J., Lin, N., Ahmad, I., Mariano, M., Dufresne, A., Thomas, S. Galeski, A. Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers, thermoplastic polymers, and porous nanocomposites, *Progress in Polymer Science* (2018) 87: 197-227. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.008>
- [H10] Kargarzadeh, H., A. Galeski, A. Pawlak. PBAT green composites: effects of kraft lignin particles on the morphological, thermal, crystalline, macro and micromechanical properties, *Polymer* (2020) 203, 122748. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122748>
- [H11] Kargarzadeh, H., Kobylinska, A., Antos-Bielska, M., Krzyzowska, M., Galeski, A. Exploring the potential of lignin nanoparticles in enhancing the mechanical, thermal, and bioactive properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate), *International Journal of Biological Macromolecules* (2024) 262, 129880. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129880>
- [1] Kargarzadeh, H., Ioelovich, M., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources, in *Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites*, Editors: Kargarzadeh, H., Ahmad, I., Thomas, S., & Dufresne, A., (2017), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Germany. p. 1–49. <https://doi.org/10.1002/9783527689972.ch1>
- [2] Kargarzadeh, H., Mariano, M., Huang, J., Lin, N., Ahmad, I., Dufresne, A., Thomas. S., *Advances in cellulose nanomaterials*, *Cellulose* (2018) 25: 2151-2189. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1723-5>
- [3] Norgren, M. and Edlund, H., Lignin: Recent advances and emerging applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* (2014) 19(5): 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.08.004>
- [4] Zhang, Z., Terrasson, V., Guénin, E., Lignin Nanoparticles and Their Nanocomposites. *Nanomaterials* (2021) 11: 1336. <https://doi.org/10.3390/nano11051336>
- [5] Frangville, C., Rutkevičius, M., Richter, A. P., Velev, O. D., Stoyanov, S. D. and Paunov, V. N., Fabrication of environmentally biodegradable lignin nanoparticles. *ChemPhysChem* (2012) 13(18): 4235. <https://doi.org/10.1002/cphc.201200537>
- [6] Beisl, S., Miltner, A., Friedl, A., Lignin from Micro- to Nanosize: Production Methods. *International Journal of Molecular Sciences* (2017) 18: 1244. <https://doi.org/10.3390/ijms18061244>
- [7] Hussin, M. H., Appaturi, J. N., Poh, N. E., Abd Latif, N. H., Brosse, N., Ziegler-Devin, I., Vahabi, H., Syamani, F. A., Fatriasari, W., Solihat, N. N. and Karimah, A., A recent advancement on preparation, characterization and application of nanolignin (2022) 200: 303-326. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.007>

- [8] Liu, C., Li, B., Du, H., Lv, D., Zhang, Y., Yu, G., Mu, X. and Peng, H., Properties of nanocellulose isolated from corncob residue using sulfuric acid, formic acid, oxidative and mechanical methods. *Carbohydrate Polymers* (2016) 151: 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.025>
- [9] Kargarzadeh, H., Ahmad, I., Abdullah, I., Dufresne, A., Zainudin, S.Y. and Sheltami, R.M., Effects of hydrolysis conditions on the morphology, crystallinity, and thermal stability of cellulose nanocrystals extracted from kenaf bast fibers. *Cellulose* (2012) 19: 855–866. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9684-6>
- [10] Xie, H., Zou, Z., Du, H., Zhang, X., Wang, X., Yang, X., Wang, H., Li, G., Li, L. and Si, C., Preparation of thermally stable and surface-functionalized cellulose nanocrystals via mixed H₂SO₄/oxalic acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers* (2019) 223: 115116. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115116>
- [11] Chen, L., Zhu, J.Y., Baez, C., Kitin, P. and Elder, T., Highly thermal-stable and functional cellulose nanocrystals and nanofibrils produced using fully recyclable organic acids. *Green Chemistry* (2016) 18: 3835–3843. <https://doi.org/10.1039/c6gc00687f>
- [12] Chirayil, C.J., Joy, J., Mathew, L., Mozetic, M., Koetz, J. and Thomas, S., Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from *Helicteres isora* plant. *Industrial Crops and Products* (2014) 59: 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.020>
- [13] Yu, H., Abdalkarim, S.Y.H., Zhang, H., Wang, C. and Tam, K.C., Simple process to produce high-yield cellulose nanocrystals using recyclable citric/hydrochloric acids. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (2019) 7: 4912–4923. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05526>
- [14] Khouri, S., Experimental characterization and theoretical calculations of responsive polymeric systems, Master Thesis in Chemical engineering (2010) University of Waterloo: Waterloo. 169.
- [15] Hietala, M., Mathew, A.P., Oksman, K., Bionanocomposites of thermoplastic starch and cellulose nanofibers manufactured using twin-screw extrusion. *European Polymer Journal* (2013) 49: 950–956. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.016>
- [16] Jackson, M., The alkali treatment of straws. *Animal Feed Science and Technology* (1977) 2: 105–130. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(77\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0377-8401(77)90013-X)
- [17] Kargarzadeh, H., Sheltami, R.M., Ahmad, I., Abdullah, I. and Dufresne, A., Cellulose nanocrystal: A promising toughening agent for unsaturated polyester nanocomposite. *Polymer* (2015) 56: 346–357. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.11.054>
- [18] Sheltami, R.M., Kargarzadeh, H., Abdullah, I., Effects of silane surface treatment of cellulose nanocrystals on the tensile properties of cellulose-polyvinyl chloride nanocomposite *Sains Malaysiana* (2015) 44(6): 801–810.
- [19] Kargarzadeh, H., Sheltami, R.M., Ahmad, I., Abdullah, I. and Dufresne, A., Cellulose nanocrystal reinforced liquid natural rubber toughened unsaturated polyester: Effects of filler content and surface treatment on its morphological, thermal, mechanical, and viscoelastic properties. *Polymer* (2015) 71: 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.06.045>
- [20] Hahn, M.W., Jelic, J., Berger, E., Reuter, K., Jentys, A. and Lercher, J.A., Role of amine functionality for CO₂ chemisorption on silica. *Journal of Physical Chemistry* (2016) 120(8): 1988–95. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10012>

- [21] Wang, Y., Jia, H., Chen, P., Fang, X. and Du, T., Synthesis of La and Ce modified X zeolite from rice husk ash for carbon dioxide capture. *Journal of Materials Research and Technology* (2020) 9(3): 4368-78. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.061>
- [22] Ghazali, Z., Suhaili, N., Tahari, M.N.A., Yarmo, M.A., Hassan, N.H. and Othaman, R., Impregnating deep eutectic solvent choline chloride: urea: polyethyleneimine onto mesoporous silica gel for carbon dioxide capture. *Journal of Materials Research and Technology* (2020) 9(3): 3249-60. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.073>
- [23] Modak, A. and Jana, S., Advances in porous adsorbents for CO₂ capture and storage, in *Carbon dioxide chemistry capture oil recovery*, Editors: I. Karamé, J. Shaya, and H. Srour,. (2017), Intechopen: London, United Kingdom. p. 165-83.
- [24] Kargarzadeh, H., Sheltami, R.M., Ahmad, I., Abdullah, I. and Dufresne, A., Toughened polyester cellulose nanocomposites: Effects of cellulose nanocrystals and liquid epoxidized natural rubber on morphology and mechanical properties. *Industrial Crops and Products* (2015) 72: 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.052>
- [25] Kim, J., Rubino, I., Lee, J.Y., Choi, H.J., Application of halloysite nanotubes for carbon dioxide capture. *Mater Res Express* (2016) 3(4): 045019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/4/045019>
- [26] Wu, Y., Zhang, Y., Chen, N., Dai, S., Jiang, H. and Wang, S., Effects of amine loading on the properties of cellulose nanofibrils aerogel and its CO₂ capturing performance. *Carbohydrate Polymers* (2018) 194: 252-9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.017>
- [27] Ahmadi, M., Madadlou, A., Saboury, A. A., Whey protein aerogel as blended with cellulose crystalline particles or loaded with fish oil. *Food Chemistry* (2016) 196: 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.031>
- [28] Ishak, W.H.W., Rosli, N.A., Ahmad, I., Ramli, S. and Amin, M.C.I.M., Drug delivery and in vitro biocompatibility studies of gelatin-nanocellulose smart hydrogels cross-linked with gamma radiation. *Journal of Materials Research and Technology* (2021) 15: 7145–7157. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.095>
- [29] Zainuddin, N., Ahmad, I., Zulfakar, M.H., Kargarzadeh, H. and Ramli, S., Cetyltrimethylammonium bromide-nanocrystalline cellulose (CTAB-NCC) based microemulsions for enhancement of topical delivery of curcumin. *Carbohydrate Polymers* (2021) 254: 117401. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117401>
- [30] Pinheiro, I.F., Ferreira, F.V., Souza, D.H.S., Gouveia, R.F., Lona, L.M.F., Morales, A.R. and Mei, L.H.I., Mechanical, rheological and degradation properties of PBAT nanocomposites reinforced by functionalized cellulose nanocrystals. *European Polymer Journal* (2017) 97: 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.10.026>
- [31] Wu, C.S., Characterization of cellulose acetate-reinforced aliphatic-aromatic copolyester composites. *Carbohydrate Polymers* (2012) 87: 1249–1256. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.009>
- [32] Moustafa, H., Guizani, C., Dupont, C., Martin, V., Jeguirim, M. and Dufresne, A., Utilization of torrefied coffee grounds as reinforcing agent to produce high-quality biodegradable PBAT composites for food packaging applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2017) 5: 1906–1916. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02633>

- [33] Li, J., Lai, L., Wu, L., Severtson, S.J. and Wang, W.J., Enhancement of water vapor barrier properties of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) films with highly oriented organomontmorillonite. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2018) 6: 6654–6662. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00430>
- [34] Le Digabel, F. and Averous, L., Effects of lignin content on the properties of lignocellulose-based biocomposites. *Carbohydrate Polymer* (2006) 66: 37–545. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.04.023>
- [35] Xing, Q., Ruch, D., Dubois, P., Wu, L. and Wang, W.J., Biodegradable and highperformance poly(butylene adipate-coterephthalate) Lignin UV-blocking films. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2017) 5: 10342–10351. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02370>
- [36] Rosli, N.A., Karamanlioglu, M., Kargarzadeh, H. and Ahmad, I., Comprehensive Exploration of Natural Degradation of Poly (lactic acid) Blends In Various Degradation Media: A review. *Journal of Biological Macromolecule* (2021) 187: 732-741. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.196>
- [37] Cherian, R.M., Kargarzadeh, H., Rosli, N.A., Jose, C. and Thomas, S., Tuning the hydrophilic/hydrophobic behavior of biopolymers surface modifications, in *Handbook of Biopolymers*, S. Thomas, S., et al., Editors. (2023) Springer: Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0710-4_14
- [38] Jose, C., et al., Date palm cellulose nanocrystals (CNCs)/polyamide composites: Tailoring morphological, mechanical, and thermal properties. *Journal of Composites and Sciences* (2023) 7(1): 17. <https://doi.org/10.3390/jcs7010017>
- [39] Cherian, R.M., Varghese, R.T., Antony, T., Malhotra, A., Kargarzadeh, H., Chauhan, S.R., Chauhan, A., Chirayil, C.J. and Thomas, S., Non-cytotoxic, high crystalline and thermal stability derived from a novel agromass of *Elettaria cardamomum*, using a soft and benign mild oxalic acid hydrolysis,. *International Journal of Biological Macromolecule* (2023) 253: 126571. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126571>
- [40] Antony, T., Cherian, R.M., Varghese, R.T., Malhotra, A., Chauhan, S.R., Chauhan, A., Kargarzadeh, H., Chirayil, C.J. and Thomas, S., Harvesting nature's treasure from agricultural biomass: *Spatholobus parviflorus* unveiled as a source of nano-scaled crystalline cellulose. 2024. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06155-3>
- [41] Varghese, R.T., Cherian, R.M., Antony, T., Chirayil, C.J., Kargarzadeh, H., Malhotra, A., Chauhan, A. and Thomas, S., Thermally stable, highly crystalline cellulose nanofibrils isolated from the lignocellulosic biomass of *G. Tiliifolia* plant barks by a facile mild organic acid hydrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery* (2023) 14: 31591-31605. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05049-0>
- [42] Cherian, R.M., Tharayil, A., Varghese, R.T., Antony, T., Kargarzadeh, H., Chirayil, C.J. and Thomas, S., A review on the emerging applications of nano-cellulose as advanced coatings. *Carbohydrate Polymers* (2022) 282: 119123. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119123>
- [43] Varghese, R.T., Cherian, R.M., Antony, T., Tharayil, A., Das, H., Kargarzadeh, H., Chirayil, C.J. and Thomas, S., A review on the bioadsorbent membrane nanocellulose for effective removal of pollutants from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (2022) 3: 100209. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100209>

- [44] Varghese, R.T., Cherian, R.M., Chirayil, C.J., Antony, T., Kargarzadeh, H. and Thomas, S., Nanocellulose as an avenue for drug delivery applications: a mini-review. *Journal of Composites Sciences* (2023) 7(6): 210. <https://doi.org/10.3390/jcs7060210>
- [45] Antony, T., Cherian, R.M., Varghese, R.T., Kargarzadeh, H., Ponnammma, D., Chirayil, C.J. and Thomas, S., Sustainable green packaging based on nanocellulose composites-present and future. *Cellulose* (2023) 30(17): 10559-10593. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05537-6>
- [46] Cherian, R.M., Antony, T., Zakuwan, S. Z., Jose, C., Kargarzadeh, H., Thomas, S., Developments in chitosan-based green nanocomposites for food packaging applications, in *Nanomaterials from renewable resources for emerging applications*, A.M. Sandeep Ahankari, Manjusri Misra, Editor. (2023), CRC Press, Taylor and Francis: Boca Raton, Florida. p. 53-90. <https://doi.org/10.1201/9781003245261-4>
- [47] Subhedar, A., Bhadauria, S., Ahankari, S. and Kargarzadeh, H., Nanocellulose in biomedical and biosensing applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* (2021) 166: 587-600. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.217>
- [48] Ahankari, S., Paliwal, P., Subhedar, A. and Kargarzadeh, H., Recent developments in nanocellulose-based aerogels in thermal applications: a review. *ACS Nano* (2021) 3: 3849-3874. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09678>
- [49] Sepahvand, S., Kargarzadeh, H., Jonoobi, M., Ashori, A., Ismaeilimoghadam, S., Varghese, R.T., Chirayil, C.J., Azimi, B. and Danti, S., Recent developments in nanocellulose-based aerogels as air filters: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* (2023) 246: 125721. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125721>
- [50] Azimi, B., Sepahvand, S., Ismaeilimoghadam, S., Kargarzadeh, H., Ashori, A., Jonoobi, M. and Danti, S., Application of cellulose-based materials as water purification filters; a state-of-the-art review. *Journal of Polymers and the Environment* (2023) 32(1): 345-366. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02989-6>
- [51] Tiwari, O.N., Bobby, M.N., Kondi, V., Halder, G., Kargarzadeh, H., Ikbāl, A.M.A., Bhunia, B., Thomas, S., Efferth, T., Chattopadhyay, D. and Palit, P., Comprehensive review on recent trends and perspectives of natural exo-polysaccharides: Pioneering nano-biotechnological tools. *International Journal of Biological Macromolecules* (2024) 265: 130747. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130747>
- [52] Debnath, R., Ikbāl, A.M.A., Kargarzadeh, H., Palit, P. and Thomas, S., Carbon Nanodots-Based Polymer Nanocomposite: A Potential Drug Delivery Armament of Phytopharmaceuticals. *Polymers* (2024). <https://doi.org/10.20944/preprints202407.1934.v1>
- [53] Sheltami, R.M., Abdullah, I., Ahmad, I., Dufresne, A. and Kargarzadeh, H., Extraction of cellulose nanocrystals from mengkuang leaves (*Pandanus tectorius*). *Carbohydrate Polymers* (2012) 88 (2): 772-779. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.01.062>
- [54] Kargarzadeh, H., Siti Yasmine, Z. Z., Ahmad, I., Isolation of Cellulose Nanowhiskers from Kenaf Fiber, in *Natural Polymers, Biopolymers, Biomaterials, and Their Composites, Blends, and IPNs*, Thomas, S., Mohan, S., Francis, E., Editor. (2012) Apple Academic Press, Taylor & francis Group: New York. p. 219-228. <https://doi.org/10.1201/b13117-21>
- [55] Kargarzadeh, H., Ahmad, I., Abdullah, I., Thomas, R., Dufresne, A., Thomas, S. and Hassan, A., Functionalized liquid natural rubber and liquid epoxidized natural rubber: A promising green toughening agent for polyester. *Journal of Applied Science* (2014) 132(3): 1-15.

<https://doi.org/10.1002/app.41292>

- [56] Kargarzadeh, H., Mariano, M., Huang, J., Lin, N., Ahmad, I., Dufresne, A. and Thomas, S., Recent developments on nanocellulose reinforced polymer nanocomposites: a review. *Polymer* (2017) 132: 368-393. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.09.043>
- [57] Perchacz, M., Rozanski, A., Kargarzadeh, H. and Galeski, A., Cavitation in high density polyethylene/ Al_2O_3 nanocomposites. *Composites Science and Technology* (2020) 199: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108323>