



Politechnika Łódzka

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

ul. Wólczańska 213, 93-005 Łódź

tel. 42 631 37 00, fax. 42 636 56 63

Dr Aleksandra Ziemińska-Stolarska

Załącznik 4

**Zastosowanie Analizy Cyklu Życia do środowiskowej
oceny procesów technologicznych w różnych gałęziach
przemysłu**

Autoreferat

Łódź, 2025

Spis treści

Spis rysunków	4
Spis tabel	4
Indeks skrótów	5
1. Imię i nazwisko habilitanta.....	6
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.	6
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	6
4. Tytuł osiągnięcia naukowego	7
5. Zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych.....	7
6. Spis publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	8
7. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).....	11
7.1 Wprowadzenie.....	11
8. Zastosowanie Analizy Cyklu Życia do środowiskowej oceny procesów technologicznych.....	15
8.1 Zastąpienie indu w produkcji transparentnych tlenków przewodzących dla ekranów ciekłokrystalicznych LED i QLED	15
8.2 Analiza obciążeń środowiskowych nowej generacji ogniw fotowoltaicznych	18
8.3 Analiza Cyklu Życia i śladu węglowego technologii produkcji kompozytów wzmacnianych włóknami.....	23
8.4 Ocena środowiskowa produkcji cyklicznych dinukleotydów: analiza porównawcza syntezy biokatalitycznej i chemicznej	26
8.5 Analiza Śladu Węglowego dla technologii dystrybucji energii w samolotach o napędzie hybrydowo-elektrycznym.....	29
8.6 Zastosowanie analizy cyklu życia w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym	32
9. Podsumowanie.....	33
10. Omówienie merytoryczne pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych z okresu całej kariery zawodowej.....	35
10.1 Monitoring i badania jakości wód powierzchniowych.....	35
10.2 Reaktor do namnażania komórek macierzystych	43
10.3 Analiza śladu węglowego dla Politechniki Łódzkiej	46
10.4 Ocena obciążeń środowiskowych technologii absorpcji CO ₂ z gazów odlotowych za pomocą analizy cyklu życia w ramach projektu INVITES.....	49
11. Informacja o wykazaniu się istotną aktywnością naukową w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej.	55
12. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.....	58
12.1 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych.....	58
12.2 Informacja o osiągnięciach organizacyjnych	60

12.3. Informacja o osiągnięciach popularyzujących naukę i upowszechniających wyniki badań naukowych	61
12.3.1. Wystąpienia na konferencjach naukowców	63
13. Międzynarodowe i krajowe nagrody, wyróżnienia i medale za działalność naukową	65
14. Szkolenia i kursy	66
15. Dorobek naukowy opublikowany przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	67
16. Analiza bibliometryczna dorobku naukowego (stan na dzień 17.02.2025) - według raportu przygotowanego przez bibliotekę Politechniki Łódzkiej	69
Bibliografia:	70

Spis rysunków

Rysunek 1. Schemat syntezy trimetyloaminy.....	16
Rysunek 2. Technologia optycznego mikro-śledzenia zastosowana w panelach fotowoltaicznych	18
Rysunek 3. Granice systemu przyjęte do obliczeń śladu węglowego dla analizowanego panelu HCPV.	20
Rysunek 4. Wyniki analizy śladu węglowego dla technologii wytwarzania FRP.	53
Rysunek 5. Droga chemicznej syntezy 2'3'-cGAMP.....	27
Rysunek 6. Droga biosyntezy 2'3'-cGAMP.	27
Rysunek 7. Procentowy udział poszczególnych etapów syntezy a) biosyntezy i b) syntezy chemicznej dla 4 kategorii wpływów (potencjał globalnego ocieplenia, wpływ na zdrowie ludzkie, niedobór zasobów, wpływ na ekosystem).	28
Rysunek 8. Architektura układu elektrycznego opracowana w ramach projektu HECATE.....	31
Rysunek 9. Lokalizacja i fotografia stacjonarnego systemu pomiaru parametrów jakości wody oraz danych meteorologicznych, zainstalowanego na Zalewie Sulejowskim.....	39
Rysunek 10. Schemat i fotografia mobilnego systemu do pomiarów monitoringowych.....	40
Rysunek 11. Profil zmian stężenia chlorofilu ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) na obszarze Zalewu Sulejowskiego, uzyskany za pomocą mobilnego systemu pomiarowego w dniu 19.07.2016 r.....	41
Rysunek 12. Wielkość emisji CO_2eq dla poszczególnych elementów budowy wkładów bioreaktora do namnażania komórek macierzystych.....	45
Rysunek 13. Uproszczony schemat procesu oraz schemat technologii absorpcji CO_2 z wykorzystaniem urządzenia RPB.....	51
Rysunek 14. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO_2 z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze zasoby.....	52
Rysunek 15. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO_2 z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze ekosystemu.....	53
Rysunek 16. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO_2 z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze – zdrowie ludzkie.....	54
Rysunek 17. Trójwymiarowa siatka obliczeniowa wygenerowana w programie GEMSS.....	55
Rysunek 18. Rozkład a) temperatur i b) azotanów (NO_3^-) wzdłuż zbiornika, w maju 2015r.....	56

Spis tabel

Tabela 1. Zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych.....	7
Tabela 2. Wyniki obciążeń środowiskowych dla materiałów i technik stosowanych w celu otrzymania warstw transparentnych tlenków przewodzących.	16
Tabela 3. Tabela inwentarzowa dla modułu HCPV.	50
Tabela 4. Wyniki analizy porównawczej z zastosowaniem metodologii ReCiPe	28
Tabela 5. Elementy do budowy wkładu z czujnikami Steemore wraz z ich masą.....	45
Tabela 6. Wyniki śladu węglowego dla poszczególnych kampusów Politechniki Łódzkiej w latach 2019-2021.....	47
Tabela 7. Ślad węglowy Politechniki Łódzkiej w roku 2023 w przeliczeniu na m^2 powierzchni.....	48
Tabela 8. Wyniki śladu węglowego dla poszczególnych kampusów Politechniki Łódzkiej w latach 2019-2021.....	50

Indeks skrótów

ALD – Atomic Layer Deposition
AZO – Aluminium Zinc Oxide
CDN – Cykliczne Dinukleotydy
CFD – Computational Fluid Dynamics
CVD – Chemical Vapour Deposition
DALY – Disability Adjusted Life Years
DEZ – Diethylzinc – C_2H_5Zn
EPBT – Environmental Payback Time
FRP – Fiber Reinforced Plastic
GEMSS – Generalized Environmental Modeling System for Surfacewaters
GWP – Global Warming Potential
HCPV – High Concentration Photovoltaics
HECATE – Hybrid-ElectriC regional Aircraft distribution Technologies
HIPERION – Hybrid Photovoltaics For Efficiency Record Using Integrated Optical Technology
HVDC – High Voltage Direct Current
INREP – Towards Indium free TCOs
INVITES – Innovative Equipment for Intensified Recovery of CO_2 from Flue Gases
IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO – International Organization for Standardization
ITO – Indium Tin Oxide
KHVDC – Very High Voltage Direct Current
LCA – Life Cycle Assessment
LCPV – Low Concentration Photovoltaics
LED – Light Emitting Diode
LVDC – Low Voltage Direct Current
PMMA – Poly methyl methacrylate
PVD – Physical Vapour Deposition
QLED – Organic Light Emitting Diode
RDOŚ – Regionalne Dyrekcje Ochrony Środowiska
RPB – Rotated Backed Bed
RZGW – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej
SETAC – The Society of Environmental Toxicology and Chemistry
TCO – Transparent Conductive Oxides
TMA – Trimethylamine
WASP – Water Analysis Symulation Program
WIOŚ – Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska
YLD – Years Lived Disabled
ZPU PŁ – Zintegrowany Program Politechniki Łódzkiej

1. Imię i nazwisko habilitanta

Aleksandra Ziemińska-Stolarska

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5380-8079>

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**06.2008 Tytuł magistra**

10.2004- 06.2008 Jednolite studia magisterskie: Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

Praca magisterska obroniona w Katedrze Biofizyki Skażeń Środowiska pod kierunkiem prof. dra hab. Wirgiliusza Dudy pt. „Ocena zawartości chlorofenoli i ich pochodnych w wodach wodociągowych”.

06.2014 Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska

10.2009-06.2014 Studia doktoranckie Inżynieria Chemiczna w Ochronie Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka

Rozprawa doktorska w Katedrze Inżynierii Środowiska pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Ireneusza Zbicińskiego pt.: „**Analysis of the flux of biogenic substances in the dam reservoir on the example of Sulejow Reservoir**” („**Analiza wpływu zmian strumieni biogenów na poziom eutrofizacji wód Zbiornika Sulejowskiego**”).

Rozprawa doktorska obroniona z wyróżnieniem w dniu 6 czerwca 2014 na Politechnice Łódzkiej.

Promotor w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. inż. Ireneusz Zbiciński

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Hanna Obarska-Pempkowiak – Politechnika Gdańska

Dr hab. inż. Jerzy Sęk, prof. nadzw. PŁ – Politechnika Łódzka

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

07.2010-12.2011 Starszy chemik w Katedrze Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka.

01.2012-01.10.2014 Asystent naukowo-dydaktyczny w Katedrze Technik Inżynierii Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka.

01.10.2014–obecnie, Adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze Inżynierii Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka.

4. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 219 ust. 1 pkt.2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) wskazuję cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie, zebranych pod wspólnym tytułem: **„Zastosowanie Analizy Cyklu Życia do środowiskowej oceny procesów technologicznych w różnych gałęziach przemysłu”**.

5. Zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych

Mój całkowity dorobek naukowy obejmuje łącznie 26 prac w tym 17 artykułów opublikowanych w czasopismach indeksowanych przez Thomson Reuters Journal Citation Report (JCR). Tabela 1. przedstawia wykaz dorobku naukowego z podziałem na okres przed i po doktoracie.

Tabela 1. Zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych.

Lp.	Osiągnięcia naukowe	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora	Razem
1.	Publikacje w czasopismach posiadających współczynnik wpływu Impact Factor (IF)	2	15	17
2.	Publikacje w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu IF	2	2	4
3.	Publikacje w recenzowanych materiałach konferencyjnych (min. 2 str. A4)	1	2	3
4.	Rozdziały w monografiach naukowych w języku angielskim	1	1	2
5.	Udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	14	18	32
5a.	Wygłoszone referaty	12	21	33
5b.	Przedstawione postery	2	1	3
6.	Liczba międzynarodowych projektów badawczych	2	6	8

6. Spis publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego to oryginalne prace badawcze, które powstały po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora nauk technicznych. Prace zostały uporządkowane w kolejności ich omawiania w dalszej części Autoreferatu.

[A.1] A. Ziemińska-Stolarska, M. Pietrzak, I. Zbiciński, Comparative LCA Analysis for Replacement of Materials to Reduce Environmental Impact, Chemical Engineering Transactions, 2022, 96, 145-150 <https://doi.org/10.3303/CET2296025>

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2022: 20
--

Udział merytoryczny: sformułowanie celu i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, przeprowadzenie obliczeń obciążeń środowiskowych dla materiałów mogących stanowić alternatywę dla indu; analiza wyników i sformułowanie wniosków; kwerenda bibliograficzna; wizualizacja danych, nadzór nad całością prac związanych z przygotowaniem wyników badań do publikacji, zredagowanie pierwszej wersji tekstu manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych; pierwszy autor, autor korespondencyjny.

Wkład: 80%

[A.2] A. Ziemińska-Stolarska, M. Pietrzak, I. Zbiciński, Application of LCA to Determine Environmental Impact of Concentrated Photovoltaic Solar Panels–State-of-the-Art. Energies, 2021 ISSN:1996-1073, vol. 14, no. 11, 1-18 <https://doi.org/10.3390/en14113143>

IF (2023): 3,252

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2021: 140

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych do obliczeń śladu węglowego; interpretacja wyników i formułowanie wniosków; współudział w redagowaniu pierwszej wersji tekstu manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych, opracowanie części ilustracyjnej wyników badań, pierwszy autor, autor korespondencyjny.

Wkład: 75%

[A.3] A. Ziemińska-Stolarska, M. Pietrzak, I. Zbiciński, Effect of Recycling on the Environmental Impact of a High-Efficiency Photovoltaic Module Combining Space-Grade Solar Cells and Optical Micro-Tracking, Energies, 2023, 16(8): 3302 <https://doi.org/10.3390/en16083302>

IF (2023): 3,0

Lista ministerialna czasopism punktowanych 05.01.2024: 140

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie koncepcji badań i przeprowadzenie obliczeń śladu węglowego; interpretacja wyników i formułowanie wniosków; współudział w redagowaniu pierwszej wersji tekstu

manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych; opracowanie części ilustracyjnej wyników analiz, pierwszy autor, autor korespondencyjny.

Wkład: 80%

[A.4] A. Ziemińska-Stolarska, M. Sobulska, M. Pietrzak, I. Zbiciński, Application of Life Cycle Assessment to Analysis of Fibre Composite Manufacturing Technologies in Shipyards Industry. Processes. 2024; 12(3):461 <https://doi.org/10.3390/pr12030461>

IF (2024): 2,8

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2024: 70

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych do obliczeń śladu węglowego, interpretacja wyników i formułowanie wniosków; przeprowadzenie i dobór przeglądu literatury; współudział w redagowaniu pierwszej wersji tekstu manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych; opracowanie części ilustracyjnej wyników badań, pierwszy autor, autor korespondencyjny.

Wkład 70%

[A.5] A. Ziemińska-Stolarska, M. Sobulska, M. Pietrzak, I. Zbiciński, A Review of End-of-Life Scenarios for Fibre-Reinforced Polymer Materials. Energies, 2024, 17, 3713 <https://doi.org/10.3390/en17153713>

IF (2023): 3,0

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2023: 140

Udział merytoryczny: sformułowanie celu i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, przeprowadzenie obliczeń śladu węglowego dla fazy „End of Life” materiałów FRP; analiza wyników i formułowanie wniosków, kwerenda bibliograficzna; przygotowanie pierwszej wersji tekstu manuskryptu i korekta ostatecznej wersji, pierwszy autor.

Wkład: 70%

[A.6] M. Becker, A. Ziemińska-Stolarska, D. Markowska, S. Lütz, K. Rosenthal, Comparative Life Cycle Assessment of Chemical and Biocatalytic 2'3'-Cyclic GMP-AMP Synthesis, ChemSusChem, 2023, 16, e202201629 <https://doi.org/10.1002/cssc.202201629>

IF (2023): 7,5

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2023: 140

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, opracowaniu koncepcji badań i przeprowadzeniu analizy porównawczej wraz z analizą czułości; interpretacja wyników i formułowanie wniosków; współudział w redagowaniu pierwszej wersji tekstu manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych.

Wkład: 55%

[A.7] D. Izquierdo, G. Casas, A.G. Garriga, I. Castro, A. Ziemińska-Stolarska, M. Sobulska, M. Zbiciński, I. Electrical Distribution System LCA for Future Regional

Aircraft–Preliminary Definition of Methodology. Aerospace, 2023, 10, 920.
<https://doi.org/10.3390/aerospace10110920>

IF (2023): 2,1

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2023: 70

Udział merytoryczny: współudział w sformułowaniu problemu badawczego, opracowaniu koncepcji badań, formułowanie wniosków; przeprowadzenie i dobór przeglądu literatury; współudział w redagowaniu pierwszej wersji tekstu manuskryptu i wersji po poprawkach recenzyjnych; opracowanie części ilustracyjnej, autor korespondencyjny.

Wkład 50%

[A.8] S. Ledakowicz, A. Ziemińska-Stolarska, The role of life cycle assessment in the implementation of circular economy in sustainable future. Chemical and Process Engineering: New Frontiers, 2023, 44(4), e37 <https://doi.org/10.24425/cpe.2023.147396>

IF (2023): 0,5

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2023: 100

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie koncepcji pracy; opracowanie przeglądu literaturowego, w tym informacji dotyczących możliwości zastosowania analizy cyklu życia do redukcji obciążeń środowiskowych w wielu gałęziach przemysłu, współudział w redagowaniu tekstu manuskryptu i redagowanie ostatecznej wersji artykułu po poprawkach recenzyjnych; opracowanie części ilustracyjnej, autor korespondencyjny.

Wkład: 80%

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

7.1 Wprowadzenie

Analiza Cyklu Życia (LCA) stanowi istotne narzędzie zarządzania środowiskowego, które umożliwia identyfikację kluczowych aspektów oraz ocenę ich negatywnego wpływu na środowisko w pełnym cyklu życia produktu, począwszy od pozyskiwania surowców naturalnych, przez wytwarzanie, dystrybucję, transport, użytkowanie, ponowne użycie, recykling, aż po ostateczne unieszkodliwienie odpadów. W ciągu ostatnich dwóch dekad zaobserwowano dynamiczny rozwój metodologii analizy cyklu życia (LCA), który zaowocował opracowaniem zaawansowanych technik obliczeniowych oraz stworzeniem baz danych umożliwiających uzyskanie szczegółowych informacji na temat obciążeń środowiskowych generowanych przez procesy i produkty w całym ich cyklu życia. Taki postęp umożliwia przeprowadzenie wiarygodnych analiz wpływu na środowisko oraz ocenę przewagi konkurencyjnej projektowanych rozwiązań. Proces prowadzenia analiz LCA polega na tworzeniu struktury, w której definiowane są wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi komponentami procesu, obejmującego etapy projektowania, produkcji, eksploatacji oraz zagospodarowania odpadów. Tego rodzaju agregacja czynników, zgodnie z określonymi kategoriami wartości, pozwala na oszacowanie wpływu poszczególnych procesów jednostkowych na środowisko. Wyniki analizy dostarczają mierzalnych wartości, odnoszących się zarówno do całego produktu, jak i jego poszczególnych składowych. Rezultaty analizy LCA oraz ich interpretacja wspomagają proces podejmowania decyzji i prowadzą do redukcji negatywnego wpływu procesów wytwórczych na środowisko. Do głównych zalet wdrożenia analizy LCA należy m.in. identyfikacja oraz udokumentowanie potencjalnego negatywnego oddziaływania badanych produktów, procesów i materiałów, analiza pełnego „cyklu życia” produktu, a także uzyskanie mierzalnych (ilościowych) ocen dotyczących zużycia materiałów, surowców, energii oraz wielkości zanieczyszczeń i odpadów wprowadzanych do ekosystemu.

Pierwsze prace badawcze dotyczące aspektów oraz oceny potencjalnych wpływów na środowisko produktów i procesów miały miejsce na przełomie lat 60. i 70. XX wieku. Raport Harolda Smitha z 1963 roku, przedstawiający analizę produkcji różnych rodzajów energii w wybranych procesach chemicznych na Światowej Konferencji Energetycznej, jest uznawany za jeden z pierwszych dokumentów zawierających elementy oceny cyklu życia. Jednak za początek formalnego rozwoju LCA uznaje się 1979 rok, kiedy to powołano pozarządowe stowarzyszenie SETAC (The Society of Environmental Toxicology and Chemistry).

W 1993 roku opublikowano dokument „A Code of Practice”, który stanowił pierwszą szeroko akceptowaną strukturę analizy cyklu życia. W połowie lat 90. XX wieku Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) rozpoczęła prace nad normowaniem techniki LCA, co zaowocowało opracowaniem grupy norm ISO w serii 14040, opisujących strukturę oraz metodologię przeprowadzania analiz LCA. Do kluczowych norm ISO należy *PN-EN ISO 14040:2009* „Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia. Zasady i struktura” oraz *PN-EN ISO 14044:2009* „Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia.

LCA – Wymagania i wytyczne”. Dodatkowo, opracowano normy takie jak *ISO 14045 (Ocena efektywności ekologicznej)*, *ISO/TR 14047 (Przykłady LCA w zarządzaniu środowiskowym)*, *ISO/TS 14048 (Format dokumentowania danych LCA)*, oraz *ISO/TS 14072 (Wymagania i wytyczne dla LCA na poziomie organizacyjnym)*.

W ciągu ostatnich dwóch dekad zauważalny jest pozytywny postęp w zakresie świadomości, wiedzy i ustawodawstwa dotyczącego zrównoważonego rozwoju oraz interpretacji cyklu życia. W 2013 roku Komisja Europejska opublikowała zalecenia dotyczące stosowania wspólnych metod oceny efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji (2013/179/UE), zachęcając do stosowania metodyki LCA w procesach optymalizacji produkcji oraz w zwiększaniu świadomości w zakresie odpowiedzialnej konsumpcji poprzez komunikowanie informacji o efektywności środowiskowej produktów.

Zgodna z normą ISO analiza cyklu życia obejmuje cztery fazy: określenie celów i zakresu badania, przygotowanie inwentaryzacji cyklu życia (inwentaryzacja wejść i wyjść), ocenę wpływu i ocenę oraz interpretację wyników badań.

1. Określenie celu i zakresu badań (ang. **Goal and Scope**) zgodnie z normą ISO, cel badania powinien jednoznacznie określać zamierzony sposób wykorzystania wyników, powody przeprowadzenia analizy oraz docelowego odbiorcę, czyli podmiot, do którego będą kierowane rezultaty badania. Na tej podstawie określa się metodologię przeprowadzania analizy, uwzględniając jej szczegółowość oraz zakres. Poziom szczegółowości analizy jest ściśle związany z zakresem decyzji, które będą podejmowane na podstawie uzyskanych wyników (analiza może być przeprowadzona na etapie koncepcyjnym, szczegółowym lub uproszczonym). Na tym etapie następuje również definiowanie systemu produktu lub procesu technologicznego, ustalanie granic systemu, określanie funkcji systemu oraz jednostki funkcjonalnej¹.

2. Analiza zbioru danych (ang. **Life Cycle Inventory**) jest to ilościowe przypisanie danych wejściowych i wyjściowych do modelowanego systemu wyrobu. Analiza zbioru danych wejściowych oraz wyjściowych przeprowadzana jest dla poszczególnych procesów jednostkowych, które tworzą modelowany system wyrobu, uwzględniając granice tego systemu. Na tym etapie przeprowadza się inwentaryzację danych dotyczących m.in. zużycia materiałów, wielkości emisji (do wody, gleby i powietrza), zużycia wody, energii, paliw kopalnych, rodzaju transportu, ilości i rodzaju odpadów oraz metod ich utylizacji. Zebrane dane wejściowe i wyjściowe stanowią podstawę do kolejnego etapu analizy cyklu życia, którym są obliczenia wpływu na środowisko dla określonych kategorii oddziaływania.

3. Ocena wpływu cyklu życia (ang. **Life Cycle Impact Assessment**), dostępnych jest wiele metod oceny wpływu cyklu życia zaimplementowanych w wyspecjalizowanych programach obliczeniowych, z których najbardziej rozpowszechnione to: IPCC 2021, CML 2 baseline 2000, ReCiPe oraz IMPACT 2002+. Wymienione metody różnią się między sobą kategoriami wpływu oraz parametrami charakteryzowania tych samych kategorii, w których badany jest wpływ na środowisko. Metody te dzielą się na te oparte wyłącznie

¹ G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.P. Schmidt, S. Suh, B.P. Weidema, D.W. Pennington: Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*. 30 (5). 2004. pp.701-20.

o efekty pośrednie (kategorie wpływu) uznawane za podstawowe, oraz te bazujące na efektach końcowych (kategorie szkody) przy ustalaniu kategorii oddziaływania na środowisko.

4. Interpretacja wyników polega na analizie przyjętych założeń oraz uproszczeń, ewaluacji wyników, a także opracowaniu raportu, na podstawie którego formułowane są wnioski i rekomendacje oraz identyfikowane kluczowe kwestie. Pod pojęciem identyfikacji znaczących kwestii (w tym kategorii danych wejściowych i wyjściowych, kategorii wpływu oraz kluczowych elementów etapów cyklu życia) rozumie się wykrycie tych aspektów działalności, które wywierają istotny, negatywny wpływ na środowisko.

Podstawowym etapem analizy cyklu życia (LCA) jest przeprowadzenie szczegółowego bilansu materiałów i energii wykorzystywanych w procesie (strumienie wejściowe), a także bilansu emisji i odpadów powstających w wyniku tych procesów (strumienie wyjściowe). Metoda LCA opiera się na analizie danych ilościowych, których interpretacja oraz przekształcenie w oddziaływania środowiskowe wymaga zastosowania odpowiednich programów obliczeniowych. Programy te zawierają wbudowane metody obliczania obciążeń środowiskowych, umożliwiając dokładną ocenę wpływu na środowisko.

Analizę LCA przeprowadza się z wykorzystaniem baz danych, które określają wpływ użytych materiałów na środowisko. W ramach swoich badań zastosowałam oprogramowanie SimaPro oraz bazę danych Ecoinvent, a także metodologię ReCiPe Endpoint H/A, Midpoint. Umożliwiło to określenie wpływu badanych materiałów na trzy kategorie szkód (zdrowie ludzi, ekosystemy, zasoby) oraz 21 kategorii wpływu (w tym m.in. eutrofizacja, zubożenie warstwy ozonowej, toksyczność dla ludzi, utrata bioróżnorodności). Ślad węglowy obliczałam przy zastosowaniu metodologii IPCC GWP (Global Warming Potential).

Baza danych Ecoinvent, ze względu na swoją kompleksowość, przejrzystość i spójność danych o produktach i procesach, jest najczęściej wykorzystywaną bazą w tego typu analizach. Ecoinvent została opracowana w Szwajcarii przez Stowarzyszenie Ecoinvent (wcześniej Ecoinvent Center, Swiss Centre for Life Cycle Inventories). Baza ta zawiera dobrze udokumentowane dane procesowe dotyczące tysięcy produktów z różnych sektorów, w tym energetycznego, transportowego, rolniczego, biopaliw, biomateriałów, chemikaliów, materiałów budowlanych oraz systemów zarządzania odpadami, wspomagając tym samym obliczenia i analizy środowiskowe.

Jednym z pierwszych etapów analizy cyklu życia (LCA) jest zdefiniowanie **jednostki funkcjonalnej oraz określenie granic systemu**. Zgodnie z normą ISO, jednostka funkcjonalna (ang. functional unit) stanowi miarę ilości analizowanego systemu wyrobu, która jest używana jako jednostka odniesienia w badaniu cyklu życia. Ustalanie jednostki funkcjonalnej jest kluczowym elementem obliczeń LCA. Dzięki przyjęciu odpowiednich jednostek funkcjonalnych, wynikających z przeznaczenia i zastosowania analizowanego systemu wyrobu, możliwe staje się porównanie różnych systemów wyrobów o tej samej funkcjonalności, pod warunkiem spełnienia dodatkowych wymagań. Wśród tych wymagań należy wymienić m.in. konieczność przyjęcia tych samych granic systemu oraz jednolitej metodologii obliczeniowej dla porównywanych wyrobów.

Granica systemu wyrobu definiowana jest jako „obszar styku pomiędzy systemem wyrobu a środowiskiem lub systemami innych wyrobów”. Granica systemu precyzuje, które procesy jednostkowe będą uwzględniane w analizie obciążeń środowiskowych. W ramach tej definicji wyróżnia się cztery główne rodzaje granic systemu:

- **„Od kołyski do grobu” (ang. cradle to grave)** – obejmuje pełny cykl życia produktu, począwszy od pozyskania surowców, przez produkcję, transport, użytkowanie, aż po ostateczne unieszkodliwienie odpadów. Ta granica systemu uwzględnia materiały i energię na wszystkich etapach cyklu produkcyjnego.
- **„Od kołyski do bramy” (ang. cradle to gate)** – obejmuje procesy od pozyskania surowców do momentu opuszczenia przez produkt bramy zakładu przemysłowego. Jest stosowana w celu oceny wpływu produkcji na środowisko, wyłączając etapy użytkowania i utylizacji.
- **„Od bramy do grobu” (ang. gate to grave)** – odnosi się do procesów, które zachodzą od momentu opuszczenia zakładu produkcyjnego aż do końca cyklu życia produktu, w tym etapu użytkowania, utylizacji i ewentualnych odpadów. Jest wykorzystywana do analizy wpływu produktu na środowisko po jego wyprodukowaniu.
- **„Od bramy do bramy” (ang. gate to gate)** – obejmuje jedynie procesy jednostkowe, które zachodzą w ramach samego etapu produkcji. Jest stosowana do określenia wpływu na środowisko w fazie produkcji lub w kontekście pojedynczego procesu technologicznego.

Wyniki obliczeń LCA mogą być wykorzystywane m.in. w procesie raportowania implementacji zasad zrównoważonego rozwoju, obliczania śladu środowiskowego, węglowego i wodnego, projektowania produktów, generowania deklaracji środowiskowych oraz określania kluczowych wskaźników wydajności procesów.

Zakres i kierunek badań, który zaowocował powstaniem prac naukowych tworzących cykl powiązanych tematycznie publikacji [A1-A8], w zakresie zastosowań analizy cyklu życia (LCA) do środowiskowej oceny procesów technologicznych był związany z tematyką realizowanych przeze mnie projektów badawczych. Oryginalne, pełno tekstowe, recenzowane artykuły naukowe przedstawiają ciągłość mojej myśli badawczej i mojego rozwoju naukowego tworzącego osiągnięcie naukowe będące podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Prezentowana seria artykułów naukowych tworzy spójną narrację na wyżej wskazany temat badawczy.

Zasadniczym celem naukowym zrealizowanych badań, których wyniki omówiono w powiązanych tematycznie publikacjach było wskazanie możliwości zastosowania analizy cyklu życia (LCA) w celu określenia obciążeń środowiskowych procesów technologicznych w różnych gałęziach przemysłu. **Zaprezentowane w niniejszym Autoreferacie wyniki moich prac wypełniają luki w badaniach nad alternatywnymi materiałami i zintegrowanym podejściem do LCA, co jest kluczowe dla dalszego rozwoju dyscypliny inżynierii środowiska. Brakuje informacji o specyficznych metodach oceny wpływu nowych materiałów w kontekście ich cyklu życia w różnych branżach, a także o sposobach integrowania danych z różnych źródeł w celu uzyskania dokładniejszych wyników. W literaturze brakuje także badań uwzględniających nowe wyzwania związane z zarządzaniem odpadami i recyklingiem w zamkniętych obiegach gospodarczych.**

8. Zastosowanie Analizy Cyklu Życia do środowiskowej oceny procesów technologicznych

8.1 Zastąpienie indu w produkcji transparentnych tlenków przewodzących dla ekranów ciekłokrystalicznych LED i QLED

Badania nad zastąpieniem indu stosowanego dotychczas do produkcji transparentnych filmów tlenków przewodzących w ekranach ciekłokrystalicznych LED i QLED były pierwszą technologią, dla której przeprowadziłam obliczenia LCA obciążeń środowiskowych. Ind jest surowcem, którego globalne zużycie w nadchodzących latach ma rosnąć, głównie z powodu zwiększonej produkcji ekranów ciekłokrystalicznych w Chinach². Materiały na bazie indu, zwłaszcza ITO (ang. Indium Tin Oxide), są szeroko stosowane w produkcji komponentów optoelektronicznych, takich jak diody LED, ogniwa słoneczne i ekrany dotykowe. Na całym świecie wydobywa się jedynie 570 tysięcy ton indu rocznie, a jego największe pokłady znajdują się w Chinach, Kanadzie i Japonii, co skłania do poszukiwań tańszych i łatwiej dostępnych alternatyw dla tego metalu.

Wpływ środowiskowy zastąpienia indu w produkcji ekranów ciekłokrystalicznych LED i QLED przedstawiłam w publikacji [A.1]. W pracy wykonałam kompleksowe analizy obciążeń środowiskowych związanych z wytwarzaniem warstw ochronnych ekranów ciekłokrystalicznych. Analizie poddałam zarówno materiały mogące zastąpić ind, jak i technologie ich depozycji, które spełniają wymagania nowoczesnych urządzeń optoelektronicznych.

Przeprowadziłam analizę środowiskową kilku alternatywnych materiałów dla tlenku cynowo-indowego (ITO), w tym: czystego tlenku cynku (ZnO), domieszkowanego aluminium (ZnO:Al), borem (ZnO:B) oraz tlenku cyny (SnO₂), które były osadzane przy zastosowaniu różnych technik depozycji, takich jak osadzanie z fazy gazowej za pomocą zjawisk fizycznych (Physical Vapour Deposition, PVD), chemiczne osadzanie z fazy gazowej (Chemical Vapour Deposition, CVD) oraz osadzanie warstw atomowych (Atomic Layer Deposition, ALD). Jednostką funkcjonalną dla przeprowadzonych analiz LCA była warstwa 1 cm² transparentnych tlenków przewodzących, pokrywająca ekrany ciekłokrystaliczne, w ramach systemu „od kołyski do grobu”.

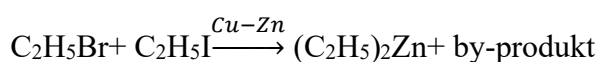
Częstym ograniczeniem analiz LCA jest brak w bazie danych analizowanych materiałów, który rozwiązuje się poprzez zastąpienie brakujących związków innymi substancjami, które spełniają podobne kryteria (takie jak struktura chemiczna, temperatura wrzenia, temperatura topnienia, palność, reaktywność czy wpływ na ekosystem) lub poprzez syntezę związków z prostych substancji dostępnych w bazach danych. Brak ten kilku związków wykorzystywanych w analizowanym procesie, w tym dietylocynku (Diethylzinc - DEZ, (C₂H₅)₂Zn, stosowanego w technice osadzania warstw CVD z tlenku cynku domieszkowanego borem (ZnO:B) oraz w technice ALD dla warstwy ZnO:Al, a także trimetyloaminy (TMA, ang. Trimethylamine), wykorzystywanej w technice ALD do produkcji powłok ZnO:Al.

Dla obu brakujących związków, tj. DEZ i TMA, istnieje możliwość zastosowania dwóch metod: zastąpienia ich związkami dostępnymi w bazach danych lub

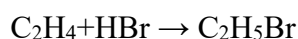
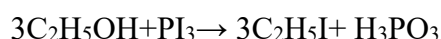
² <https://www.acs.org/greenchemistry/research-innovation/endangered-elements/indium.html> (dostęp 7.10.2024)

przeprowadzenia syntezy z prostych związków, w oparciu o dostępność odpowiednich danych.

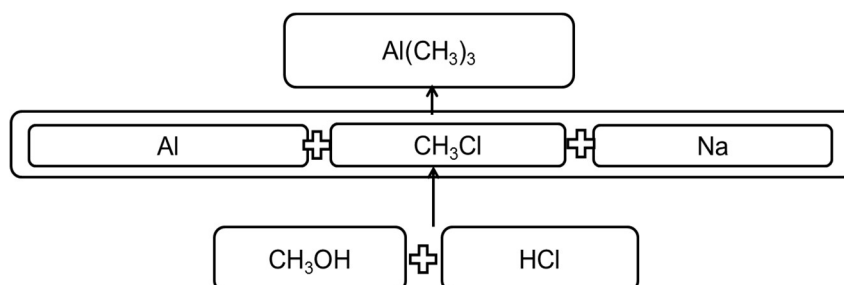
Po przeprowadzeniu szczegółowego przeglądu literatury oraz dostępnych baz danych, zaproponowałam użycie trimetyloboranu jako najbardziej odpowiedniego zamiennika dietylocynku (DEZ). Drugą metodą, którą zastosowałam, była synteza związków z prostych komponentów. W ramach projektu wykorzystałam tę metodę do syntezy DEZ i TMA w celu wytworzenia warstwy ZnO:Al, stosowanej w technice ALD. Syntezę DEZ opisuje poniższa reakcja:



Ponieważ oba związki użyte do syntezy DEZ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ i $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$) nie są dostępne w bazie danych Ecoinvent, w pierwszej kolejności przeprowadziłam syntezę tych związków, posługując się odpowiednimi reakcjami chemicznymi, które przedstawiono poniżej.³:



Do obliczeń obciążeń środowiskowych dietylocynku (DEZ) wprowadziłam do programu SimaPro odpowiednie masy substratów, uwzględniając bilans masowy oraz założenie 100% wydajności reakcji. Syntezę drugiego związku – trimetyloaminy (TMA) – przeprowadziłam zgodnie z przedstawionym schematem na rysunku 1, zakładając wydajność na poziomie 95%, zgodnie z danymi Hischiera i in. (2005)⁴). Wszystkie podstawowe komponenty do syntezy TMA dostępne są w bazie danych Ecoinvent.



Rysunek 1. Schemat syntezy trimetyloaminy.

Dla obu metod przeprowadziłam analizę wrażliwości, która wykazała, że zarówno w przypadku zamiany związków, jak i syntezy ze związków prostych, uzyskano zbliżone wartości wpływu środowiskowego, co potwierdza poprawność zastosowanych podejść. Wpływ analizowanych transparentnych tlenków przewodzących (TCO) na środowisko w znacznym stopniu zależy od zastosowanej technologii nakładania warstwy. Dla warstw naniesionych technikami CVD i ALD główny wpływ na środowisko wynika z zużycia

³ O.G. Griffiths, J.P. O'Byrne, L. Torrente-Murciano, M.D. Jones, D. Mattia, M.C. McManus: Identifying the largest environmental life cycle impacts during carbon nanotube synthesis via chemical vapour deposition. *Journal of Cleaner Production*. 42. 2013. pp.180-189.

⁴ R. Hischier, S. Hellweg, C. Capello, et al.: Establishing Life Cycle Inventories of Chemicals Based on Differing Data Availability (9 pp). *International Journal of Life Cycle Assessment* 10. 2005. pp.59–67. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.7>

energii (ponad 90%), podczas gdy w przypadku techniki PVD największe obciążenie środowiskowe generuje zużycie energii oraz materiał wyjściowy (tlenek indowo-cynowy, który odpowiada za ponad 50% wpływu) [Tabela 2].

Tabela 2. Wyniki obciążeń środowiskowych dla materiałów i technik stosowanych w celu otrzymania warstw transparentnych tlenków przewodzących.

	Związki	Technika depozycji	Partner przemysłowy	Wynik [Pt]	Wpływ [%]
1	ITO (reference case)	PVD	CSEM&MBR	1,94E-6	Indium tin oxide 52,9
2	ZnO	PVD	CSEM&MBR	9,28E-7	Electricity 94,6
3	ZnO:Al	PVD	CSEM&MBR	9,32E-7	Electricity 94,2
4	SnO ₂	PVD	CSEM&MBR	6,8E-6	Tin dioxide 86,6
5	ZnO:B	CVD	CSEM	8,47E-5	Electricity 84,1
6a	ZnO:Al(synteza)	ALD	TUE	2,5E-3	Electricity 67,6
6b	ZnO:Al(zastąpienie)	ALD	TUE	2,5E-3	Electricity 67,6
7a	ZnO:Al(synteza)	ALD	TNO	8,1E-4	Nitrogen 82,6
7b	ZnO:Al(zastąpienie)	ALD	TNO	8,07E-4	Nitrogen 82,4

Przeprowadzona przeze mnie analiza LCA technik i materiałów wykorzystywanych do produkcji warstw transparentnych tlenków przewodzących dla ekranów ciekłokrystalicznych wykazała, że zastąpienie tlenku cynowo-indowego (ITO) tlenkiem cynku (ZnO) stanowi efektywną strategię w minimalizacji wpływu procesu osadzania warstwy TCO na środowisko. Wyniki przeprowadzonych badań wniosły istotne innowacje w kontekście zrównoważonej produkcji TCO. Kluczowe wnioski z analiz obejmują następujące zagadnienia:

Efektywność energetyczna: Dalsze doskonalenie procesów osadzania powinno koncentrować się na poprawie efektywności energetycznej. Spośród analizowanych metod, technika PVD ma najmniejszy negatywny wpływ na środowisko ze względu na kilka kluczowych czynników:

- Niższe zużycie energii: proces PVD jest bardziej energooszczędny w porównaniu do innych technik osadzania, co przekłada się na mniejsze obciążenie środowiskowe.
- Mniejsze emisje: technika PVD generuje mniej szkodliwych emisji i odpadów, co zmniejsza jego wpływ na środowisko.
- Precyzyjna kontrola: technika ta pozwala na precyzyjne kontrolowanie grubości i składu warstw, co zwiększa efektywność materiałową i minimalizuje straty.

Zrównoważona produkcja: analiza LCA umożliwiła dogłębną ocenę poziomu zrównoważonej produkcji materiałów TCO, co pozwoliło osiągnąć najwyższą jakość środowiskową zgodnie ze standardami produkcyjnymi.

Przemysłowe wdrożenie: firmy takie jak Plessey Semiconductor i Meyer Burger włączyły technologię TCO bez indu do produkcji diod LED oraz wysokowydajnych ogniw fotowoltaicznych. W związku z tym wyniki projektu przyczyniły się nie tylko do

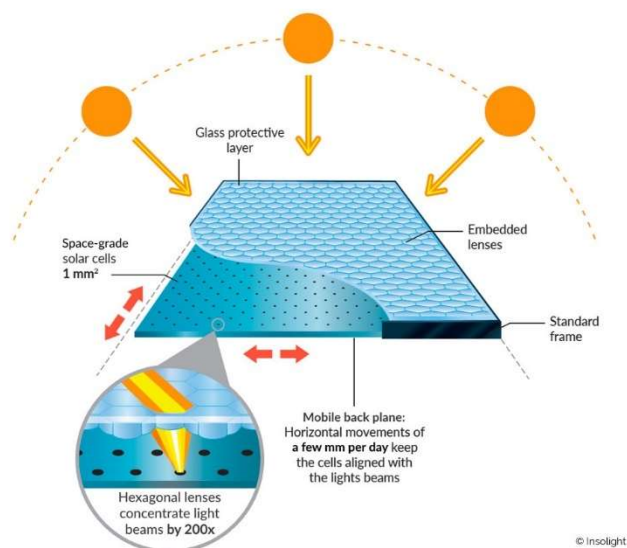
implementacji technologii o mniejszym wpływie na środowisko, ale również do wzrostu zatrudnienia w sektorze, tworząc nowe miejsca pracy.

Badania opisane w publikacji [A.1] były zrealizowane w ramach projektu o akronimie INREP: „Towards Indium free TCOs”, finansowanego z programu Horyzont 2020, który trwał w okresie od lutego 2015 do stycznia 2018 roku [P.1] (Załącznik 5). **W projekcie tym pełniłam rolę głównego wykonawcy, odpowiadając za nadzór nad całością prac związanych z planowaniem badań, analizą oraz opracowaniem raportu i interpretacją wyników LCA.** We współpracy ze wszystkimi partnerami przemysłowymi uczestniczącymi w projekcie (CSEM - Szwajcaria, MBR ELECTRONICS GmbH - Szwajcaria, TNO - Holandia, TUE - Technical University Eindhoven) dokonałam analizy zbioru danych wejściowych oraz wyjściowych dla poszczególnych procesów jednostkowych. Zbieranie danych zostało poprzedzone wizytami studyjnymi i opierało się głównie na zgromadzeniu informacji pochodzących z bezpośrednich pomiarów, analiz oraz wywiadów. Zebrane dane pierwotne zostały następnie uzupełnione danymi wtórnymi, takimi jak aktualna literatura oraz zweryfikowane dane statystyczne.

8.2 Analiza obciążeń środowiskowych nowej generacji ogniw fotowoltaicznych

Wzmocnienie konkurencyjności sektora fotowoltaicznego poprzez zastosowanie technologii optycznego mikro-śledzenia soczewkującego światło staje się niezwykle ważnym zagadnieniem w Unii Europejskiej [Rysunek 2]. Technologia ta osiąga wydajność 29%, co jest wartością znacznie wyższą niż wydajność standardowych paneli fotowoltaicznych (PV) wahająca się od 18 do 20%.

Analiza efektów środowiskowych związanych z różnymi etapami cyklu życia nowej generacji ogniw fotowoltaicznych była celem badań przedstawionych w publikacjach [A.2 i A.3].



Rysunek 2. Technologia optycznego mikro-śledzenia zastosowana w panelach fotowoltaicznych.

Pierwszy artykuł opisuje przegląd najnowszych technologii fotowoltaiki skoncentrowanej (ang. concentration photovoltaic CPV), przedstawiając dane dotyczące ogniw słonecznych i modułów pracujących w warunkach laboratoryjnych oraz

w rzeczywistym środowisku. W artykule opisałam najnowsze rozwiązania dla dwóch typów systemów fotowoltaiki skoncentrowanej: scharakteryzowałam układy fotowoltaiczne z koncentratorami o niskiej (ang. low-concentration photovoltaics LCPV) jak i wysokiej koncentracji (ang. high-concentration photovoltaics HCPV).

Przedstawiłam kilka kluczowych konkluzji dotyczących technologii koncentracyjnych ogniw fotowoltaicznych (CPV) w porównaniu do tradycyjnych systemów fotowoltaicznych (PV):

Wysoka efektywność CPV: Technologia CPV, mimo że jest jeszcze w fazie rozwoju, ma ogromny potencjał do generowania dużych ilości czystej energii. CPV jest niemal trzy razy bardziej efektywne niż tradycyjne ogniwa krzemowe (Si-PV), a ich moduły mogą osiągnąć efektywność przekraczającą 30%.

Różnice między HCPV a LCPV: Technologie HCPV (High Concentration PV) i LCPV (Low Concentration PV) różnią się pod względem zastosowanych ogniw słonecznych, optyki i stopnia koncentracji światła. Porównując ich efektywność, należy rozróżniać różne poziomy, takie jak ogniwa, podmoduły czy całe systemy.

Czas zwrotu energii (ang. Energy Payback Time): Czas zwrotu energii jest istotnym wskaźnikiem wydajności środowiskowej systemów PV. Dla HCPV czas ten wynosi od **0,22 do 2,6 lat**, a dla LCPV od **0,7 do 4,7 lat**.

Zróźnicowanie wpływu na środowisko: W metodzie oceny cyklu życia (LCA) ważne jest uwzględnienie różnych elementów modułów CPV, które mają największy wpływ na emisję CO₂. Główne źródła emisji to optyka skupiająca (często odpowiedzialna za ponad 50% śladu węglowego), systemy śledzenia oraz ramy aluminiowe lub stalowe.

Wpływ optyki skupiającej na emisję CO₂: Optyka skupiająca ma największy wpływ na emisję dwutlenku węgla, co utrudnia zmniejszenie wpływu środowiskowego tych modułów. Niemniej jednak, dzięki wysokiej efektywności konwersji energetycznej, ślad węglowy CPV jest stosunkowo niski – w przedziale 10–30 g CO₂.eq/kWh, zależnie od lokalizacji.

Recykling ogniw fotowoltaicznych: Rozwój metod recyklingu i odzysku materiałów z ogniw fotowoltaicznych wykonanych z półprzewodników III-V jest kluczowy dla poprawy zrównoważonego rozwoju przemysłu fotowoltaicznego i zmniejszenia jego wpływu na środowisko.

LCA jako narzędzie oceny: Metoda LCA staje się coraz bardziej ceniona w ocenie obciążenia środowiskowego nowych technologii, a porównania między różnymi projektami modułów CPV mogą wspierać wybór najlepszych rozwiązań już na etapie projektowania.

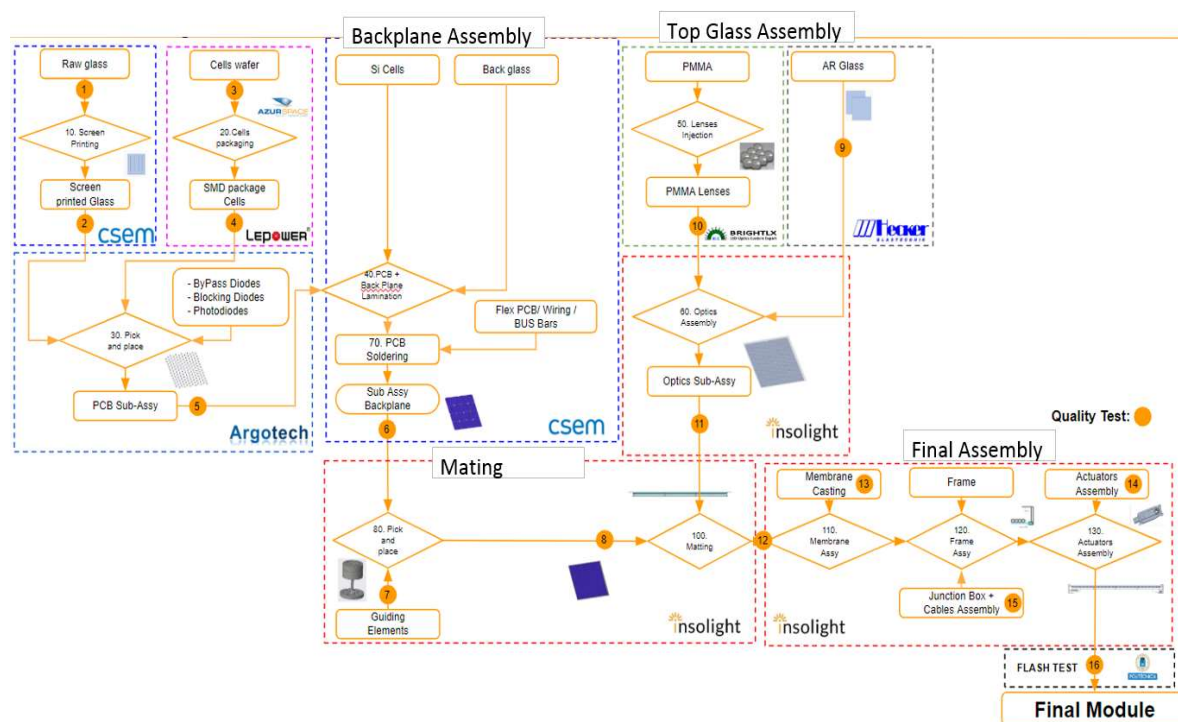
Te wnioski wskazują na obiecujący potencjał technologii CPV w zakresie wydajności energetycznej oraz jej wyzwań związanych z wpływem na środowisko, które można zminimalizować poprzez dalszy rozwój i innowacje w zakresie projektowania oraz recyklingu.

Drugi z artykułów [A.3] przedstawia szczegółową analizę cyklu życia panelu fotowoltaicznego wytworzonego w ramach projektu HIPERION [P.2] (Załącznik 5).

Artykuł prezentuje analizy śladu węglowego dla trzech generacji paneli HIPERION (GEN0, GEN1 i GEN2). Testy ostatniej z nich wykazały znakomite cechy pod względem niezawodności, łatwości produkcji, wydajności i kosztów, jak również redukcji śladu węglowego. Pierwszy moduł GEN2 powstał w grudniu 2021 roku,

a w pierwszym kwartale 2022 roku rozpoczął się montaż i monitorowanie pracy modułów w wybranych lokalizacjach pilotażowych w Portugalii, Chile i Szwajcarii. Określiłam również **czas zwrotu energii** (ang. Energy Payback Time - EPBT), czyli czas, po którym czysta energia produkowana przez panele zrekompensuje nakłady środowiskowe poniesione na budowę i działanie systemu.

W obliczeniach LCA przyjął 1kWh wyprodukowanej energii elektrycznej jako jednostkę funkcjonalną, a przyjęte granice systemu to podejście „od kołyski aż po grób” [Rysunek 3].



Rysunek 3. Granice systemu przyjęte do obliczeń śladu węglowego dla analizowanego panelu HCPV.

Do przeprowadzenia obliczeń zastosowałam oprogramowanie SimaPro wersja 9.00.49 oraz bazę danych Ecoinvent (3.8), a także model środowiskowy IPCC 2021 GWP 100a. Określiłam wpływ środowiskowy panelu HCPV na podstawie danych konstrukcyjnych, uzyskanych od partnerów przemysłowych oraz danych dotyczących recyklingu głównych elementów modułu.

Dane dotyczące materiałów i energii zbierałam na każdym etapie procesu produkcji panelu opracowując tabelę inwentarzową, będącą podstawą do opracowania i analizy wyników [Tabela 3]. W fazie interpretacji dokonałam przeglądu wszystkich etapów analizy cyklu życia w celu sprawdzenia zgodności z założeniami oraz jakości wprowadzonych danych poprzez wykonanie analiz czułości.

Tabela 3. Tabela inwentarzowa dla modułu HCPV

	Materials	Ecoinvent database
Top glass	Glass	Solar glass production
	AR (anti-reflective) coating	Market for anti-reflex-coating, etching, solar glass
	Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	Polymethyl methacrylate
	PMMA	Polymethyl methacrylate
	Monomer (60%) 1 or mixture for balance properties: methyl methacrylate/butyl acrylate Additives (0.1-1%) light stabilizer: octabenzene Photo initiator (1-6%): Hydroxy dimethyl acetophenone/ α -Hydroxy-acetophenone	Methyl methacrylate; butyl acrylate; octabenzene;
	Typical formulation for acrylic adhesive (two-component): butyl acrylate (26%) vinyl acetate (26%) acrylic acid (1%) ethylene oxide- condensate (0,5%) water (45%) potassium peroxide disulfate (0,05%)	butyl acrylate; vinyl acetate; acrylic acid; ethylene oxide;
	Glass	Solar glass production, low-iron
Backplane	AR coating	Market for anti-reflex-coating, etching, solar glass titanium dioxide zirconium oxide
	Solar cells include the latest triple/and quadruple junction technology	Gallium, semiconductor grade; Indium;
	LED package	Ceramic; silicon production, electronics grade
	Diode	Diode production, auxiliaries and energy use
	Case material- plastic- polypropylene Semiconductor material: silicon, germanium, selenium	Polypropylene; silicon production, electronics grade selenium
	Flexible film: Polyimide / polyester / fluoropolymer (standard PCD: epoxy resin + glass fiber + copper)	Electronic component
	Photosensitive area (Si photodiode) with silicone resin	Diode production, auxiliaries and energy use
	Silicone resin sealant	Silicone product production
	Resistor	Resistor production, auxiliaries and energy use
	Sensor made of silicon	Silicon production, electronics grade
Structural element	Sensor housing: plated copper, lead-frame, epoxy-based mould compound	Copper; market for epoxy resin, liquid
	Aluminum	Aluminum/ market for aluminum
	Stainless steel	Stainless steel
	Silicone adhesives and sealants	Polydimethylsiloxane (PDMS)

Całkowita emisja CO₂ na jednostkę funkcjonalną wynosiła **240 kg CO₂eq**, co skutkuje emisją CO₂ w zakresie od **20,4 do 27,9 g CO₂eq/kWh** w ciągu 25 lat. Ogniwa PV generowały największe obciążenie; **99,9 kg CO₂eq (41,7% całkowitego obciążenia środowiskowego)** ze względu na dużą ilość materiału pokrywającego powierzchnię 0,68 m² modułu. Ważny wkład miały również PMMA (16,2%), układy scalone (12,9%) i rama aluminiowa (3,64%).

Jeśli chodzi o proces produkcji panelu, największe obciążenie generowało montaż tylnej płyty (56,3%), górne szkło (21,1%) i elementy konstrukcyjne (14,1%).

Wykonane przeze mnie analizy środowiskowe wykazały, że uwzględnienie recyklingu PMMA, aluminium i elementów elektronicznych zmniejszy całkowity ślad węglowy panelu o **17%, z 240 do 201 kg CO₂eq**. Największe obciążenie środowiskowe generowały ogniwa: **99,9 kg CO₂eq, co odpowiada 49,8%** (41,7% bez recyklingu) całkowitego obciążenia środowiskowego z powodu dużej liczby ogniw słonecznych użytych w konstrukcji. Emisja CO₂ w ciągu 25-letniego okresu eksploatacji została określona na poziomie od **17,1 do 23,4 g CO₂eq/kWh** (20,4 do 27,9 bez recyklingu), w zależności od lokalizacji paneli. Czas zwrotu energii, czyli czas, po którym czysta energia produkowana przez panele zrekompensuje nakłady środowiskowe poniesione na ich budowę, dla analizowanego przeze mnie układu wynosi od **0,87 do 1,19 roku**, w zależności od lokalizacji i związanych z nią czynników nasłonecznienia (Madryt: 470 kWh/m², Lyon: 344 kWh/m²).

Badania opisane w publikacjach [A.2 i A.3] zrealizowałam w ramach projektu o akronimie **HIPERION: „Hybrid Photovoltaics For Efficiency Record Using Integrated Optical Technology”** finansowanego z programu **HORIZON 2020**, w obszarze: **„Zwiększenie konkurencyjności unijnego przemysłu fotowoltaicznego”**. Projekt HIPERION został zrealizowany przez konsorcjum 16 organizacji badawczych i partnerów branżowych.

Realizacja badań przyniosła istotne elementy nowości w obszarze analizy efektywności paneli typu CPV. Panele wytworzone w projekcie HIPERION charakteryzują się znaczną redukcją emisji dwutlenku węgla w porównaniu do tradycyjnych paneli krzemowych. Dzięki zaawansowanej technologii mikro-śledzenia, panele te są bardziej efektywne energetycznie, co przekłada się na mniejsze zużycie zasobów naturalnych. **Przeprowadzona przeze mnie analiza LCA wykazała, że produkcja paneli HIPERION wymaga mniej surowców, co zmniejsza ich wpływ na środowisko. Ponadto, panele te mają dłuższą żywotność, co oznacza mniejszą potrzebę ich wymiany i tym samym mniejszy wpływ na środowisko w dłuższym okresie.** Analizy LCA w projekcie HIPERION uwzględniały również aspekty związane z odzyskiem i recyklingiem materiałów, co dodatkowo zmniejsza ich ślad ekologiczny. Uzyskane wyniki potwierdzają, że architektura modułów HIPERION może obniżyć koszty pozyskiwania energii słonecznej ze względu na wysoką sprawność konwersji energii i wysoki uzysk energii w porównaniu z panelami z krzemu krystalicznego. **Opracowane przeze mnie wyniki dowiodły, że zastosowanie metod recyklingu i odzysku ogniw słonecznych może poprawić zrównoważony charakter branży fotowoltaicznej i zmniejszyć ślad węglowy nawet o 20%.**

8.3 Analiza Cyklu Życia i śladu węglowego technologii produkcji kompozytów wzmacnianych włóknami

Przemysł stoczniowy w Europie, mimo że jest jednym z filarów gospodarki kontynentu, niezmiennie musi się zmagać z konkurencją na rynku globalnym. Dotyczy to przede wszystkim małych i średnich stoczní europejskich, które muszą szukać równowagi między zmniejszaniem kosztów i podnoszeniem jakości procesów produkcji masowej elementów statków wykonywanych z polimerów wzmacnianych włóknami (ang. FRP Fiber-Reinforced Polymers)⁵. Wdrożenie takiego rozwiązania w środowisku Stoczni 4.0 może podnieść konkurencyjność stoczní europejskich w kontekście zużycia energii i kosztów utrzymania⁶. W porównaniu ze stalą, kompozyty FRP charakteryzują się odpornością na czynniki środowiskowe takie jak: korozja i utlenianie, co obniża koszty późniejszej konserwacji, mają też mniejszą wagę przy porównywalnej wytrzymałości. Materiały kompozytowe nie przewodzą energii elektrycznej i cieplnej, dzięki czemu działają jak izolatory utrzymując w konstrukcjach stałą temperaturę zapobiegając tym samym odkształceniom. Stal natomiast charakteryzuje się większą wytrzymałością na ściskanie, rozciąganie, uderzenia oraz obciążenia fizyczne bez utraty integralności. Komponenty wykonane z materiałów wzmocnionych włóknami są drogie w produkcji – w porównaniu z komponentami metalowymi o tej samej nośności. Dlatego są one stosowane przede wszystkim w obszarach, w których ich zalety (oszczędność masy) skutkują co najmniej odpowiednio wysokim potencjałem oszczędności nakładów finansowych. Produkcja matryc oraz włókien do komponentów FRP wiąże się jednak z obawami, ponieważ główne surowce wykorzystywane do ich wytwarzania to najczęściej ropa naftowa, gaz ziemny oraz związki chemiczne zawierające azot i chlor. Wyrób materiałów kompozytowych jest procesem energochłonnym. Produkcja zachodzi w bardzo wysokich temperaturach, co wiąże się z zapotrzebowaniem na energię oraz emisjami do środowiska substancji niepożądanych. Natomiast dzięki wysokiej wytrzymałości i odporności na korozję, materiały FRP mają dłuższą żywotność w porównaniu do surowców konwencjonalnych, takich jak stal, co może prowadzić do zmniejszenia częstotliwości wymiany i konserwacji. To z kolei zmniejsza ogólny wpływ na środowisko w długoterminowej perspektywie.

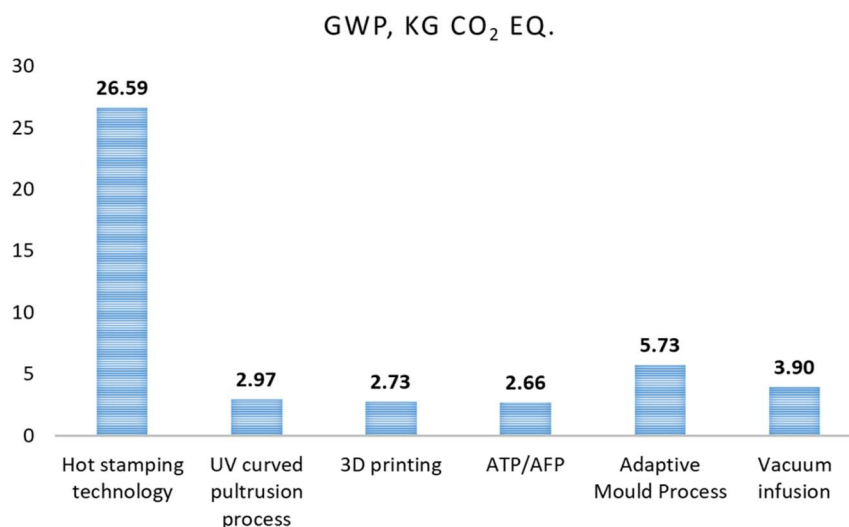
W przemyśle stoczniowym zastosowanie materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknami (FRP) może prowadzić do istotnego zmniejszenia masy jednostek pływających, co z kolei skutkuje obniżeniem zużycia paliwa oraz redukcją emisji CO₂ w trakcie eksploatacji. Niemniej jednak, większość materiałów kompozytowych pod wpływem czynników środowiskowych, takich jak promieniowanie słoneczne, zmiany temperatur i poziom wilgoci, które wpływają na procesy mechaniczne zachodzące we włóknach i matrycy, może ulegać degradacji strukturalnej. Skutkiem tego procesu może być uwolnienie cząsteczek tworzyw sztucznych do środowiska wodnego, co stanowi potencjalne zagrożenie dla ekosystemów wodnych.

W ramach badań zaprezentowanych w artykule [A.4] **przeprowadziłam analizy środowiskowe dla 5 procesów technologicznych wytwarzania włókien FRP:**

- **Pultruzja** (ang. pultrusion) to proces technologiczny, w którym włókna wzmocnione są nasycane żywicą, a następnie przeciągane przez podgrzewaną formę, w której dochodzi do ich utwardzenia, w rezultacie tworząc ciągły profil kompozytowy.
- **Infuzja próżniowa** (ang. vacuum infusion) jest procesem, w którym suche włókna umieszczane są na formie, a następnie żywica jest zasysana przez warstwy włókien za pomocą próżni, co umożliwia ich nasycenie i utwardzenie w strukturę kompozytową.
- **Drukowanie 3D** (ang. 3D printing) jest procesem wytwarzania trójwymiarowych obiektów na podstawie cyfrowego modelu, polegającym na nakładaniu materiału warstwa po warstwie w celu uzyskania ostatecznej struktury.
- **Termodruk** (ang. hot stamping) to proces polegający na gorącym tłoczeniu arkuszy kompozytów termoplastycznych w formie, w celu nadania im pożądanego kształtu. Pasy materiału umieszczane są na matrycy, gdzie, pod wpływem podwyższonej temperatury i ciśnienia, uzyskuje się kształt dwuwymiarowy na płaskiej prasie. Następnie komponent jest podgrzewany promieniowaniem podczerwonym i formowany w kształt trójwymiarowy.
- **Tworzenie form adaptacyjnych** (ang. adaptive mould) to zaawansowana technologia umożliwiająca elastyczne formowanie materiałów o skomplikowanych kształtach, które są trudne, a nawet niemożliwe do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod. Kluczową zaletą tej technologii jest bezodpadowość produkcji. Proces adaptacyjny wykorzystuje dane bezpośrednio z plików 3D, co pozwala na automatyczne dostosowanie powierzchni formy do wymaganych kształtów, eliminując potrzebę dodatkowej, ręcznej obróbki. Formy adaptacyjne umożliwiają pełną integrację, automatyzację oraz optymalizację procesu produkcyjnego.

W przyjętych założeniach do analiz jednostką funkcjonalną był 1 kg gotowego materiału, a granicami systemu podejście „od kołyski po grób”. W analizach wykorzystywałam dane pierwotne, pochodzące od partnerów przemysłowych, a do analiz śladu węglowego i interpretacji wyników wykorzystywałam metodę IPCC 2021 GWP 100a. Na rysunku 4 przedstawiłam porównanie śladu węglowego dla analizowanych technologii w całym cyklu życia, uwzględniając długość życia i sposoby utylizacji. Technologia tłoczenia na gorąco (ang. hot stamping) wykazuje najwyższy wskaźnik GWP (ang. Global Warming Potential), ponieważ jest to jedyna technologia wykorzystująca w procesie technologicznym włókno węglowe, które generuje znaczne ilości CO₂ zarówno podczas produkcji, jak i wydobywania surowców. Wyprodukowanie jednego elementu tą metodą pochłania 52,9 MJ energii elektrycznej, która jest zużywana w głównej mierze na podgrzanie formy i zasilanie pompy ciśnieniowej prasy. Proces pultruzji, drukowanie 3D oraz technika ATP/AFP wykazują najniższy i porównywalny wskaźnik GWP, nie przekraczający 3 kg CO₂ ekwiwalentu. Wynika to z faktu, że technologie te wykorzystują w procesie głównie włókno szklane i polipropylen. Infuzja próżniowa wykazuje nieznacznie wyższą wartość GWP wynoszącą 3,9 kg CO₂ ekwiwalentu, a GWP dla procesu formowania adaptacyjnego oszacowano na 5,73 kg CO₂ ekwiwalentu [Rysunek 4]. Obie technologie, oprócz włókna szklanego, używają również żywicy epoksydowej, która generuje więcej emisji CO₂ w trakcie produkcji w porównaniu do włókna szklanego, a zwłaszcza

polipropylenu. Typowe materiały stosowane w technologiach FRP można uporządkować od największego do najmniejszego wpływu na GWP w następujący sposób: włókno węglowe, pianka poliuretanowa, żywica epoksydowa, włókno szklane, polipropylen.



Rysunek 4. Wyniki analizy śladu węglowego dla technologii wytwarzania FRP.

Recykling i utylizacja materiałów FRP stanowią obecnie jedno z największych wyzwań. Ze względu na złożoną strukturę oraz silne wiązania między włóknami a osnową polimerową, materiały kompozytowe są trudne do ponownego wykorzystania. W artykule [A.5] podjęłam temat końca życia (ang. end of life, EoL) tych materiałów, prezentując przegląd dostępnych scenariuszy, takich jak: składowanie, spalanie, oraz recykling chemiczny, termiczny i mechaniczny. W pracy porównuję te scenariusze z etapem produkcji kompozytów z polimerów wzmocnianych włóknami (FRP), uwzględniając ich potencjalny wpływ na globalne ocieplenie.

W pracy dokonałam inwentaryzacji zużycia materiałów, przepływów energii oraz ilości wytwarzanych odpadów w całym cyklu życia. Wyniki obliczeń LCA pokazują, że zarządzanie odpadami (scenariusz EoL) stanowi od 5 do 39% całkowitego śladu węglowego, w zależności od sposobu utylizacji odpadów. Analiza literatury i informacje od partnerów przemysłowych potwierdzają, że standardowy i najczęstszy scenariusz dla materiałów FRP to wciąż spalanie i składowanie.

Przeprowadzone przeze mnie analizy dla technologii wytwarzania materiałów FRP nie były wcześniej publikowane w literaturze przedmiotu i mogą stanowić podstawę do podejmowania konkretnych działań praktycznych mających na celu redukcję obciążeń środowiskowych dla tego typu materiałów. Przyszłe badania i rozwój omawianych technologii powinny koncentrować się na optymalizacji wyboru materiałów oraz procesów produkcyjnych w celu minimalizacji wpływu na środowisko. Globalne naciski na wprowadzanie zrównoważonego podejścia do każdej gałęzi gospodarki skłaniają coraz więcej przedsiębiorców do sięgania po innowacyjne prośrodowiskowe rozwiązania. Również w branży materiałów kompozytowych wprowadzenie niskoemisyjnych technologii produkcji skutkować będzie redukcją negatywnego wpływu na środowisko w całym zakładanym cyklu życia.

Analizy LCA prezentowane w artykule naukowym [A.4, A.5] wykonałam w ramach finansowanego z programu Horyzont 2020 projektu o akronimie **Fibre4Yards „Fibre composite manufacturing technologies FOR the automation and modular construction in shipYARDS”**, który realizowałam w latach 2021-2023 [P.3] (Załącznik 5). W projekcie objęłam nadzór merytoryczny nad całością prac związanych z planowaniem badań, analizą i przygotowaniem raportu oraz interpretacją wyników LCA.

Realizacja projektu przyniosła istotne elementy nowości dla technologii wytwarzania FRP. Przeprowadzona przeze mnie analiza LCA elementów demonstratora, będącego efektem realizacji projektu FIBER4YARDS, wykazała, że ślad węglowy zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanego materiału, a nie ilości energii elektrycznej zużywanej w trakcie produkcji.

Konsorcjum realizujące projekt Fibre4Yards **zostało wyróżnione prestiżową nagrodą JEC Innovation Awards 2025** w Paryżu w kategorii Maritime Transport and Shipbuilding. W kategorii tej nagradzane są projekty, które wnoszą znaczące innowacje do przemysłu stocznioowego, takie jak nowe technologie produkcji, zrównoważone materiały i procesy, a także cyfrowe narzędzia wspierające projektowanie i budowę statków. Nagroda JEC Innovation Awards jest częścią programu, który co roku wyróżnia najbardziej innowacyjne projekty w branży kompozytów, zachęcając firmy i organizacje do dalszego rozwoju i współpracy. Projekty oceniane są pod kątem ich zaawansowania technicznego, potencjału komercyjnego oraz zaangażowania partnerów.

8.4 Ocena środowiskowa produkcji cyklicznych dinukleotydów: analiza porównawcza syntezy biokatalitycznej i chemicznej

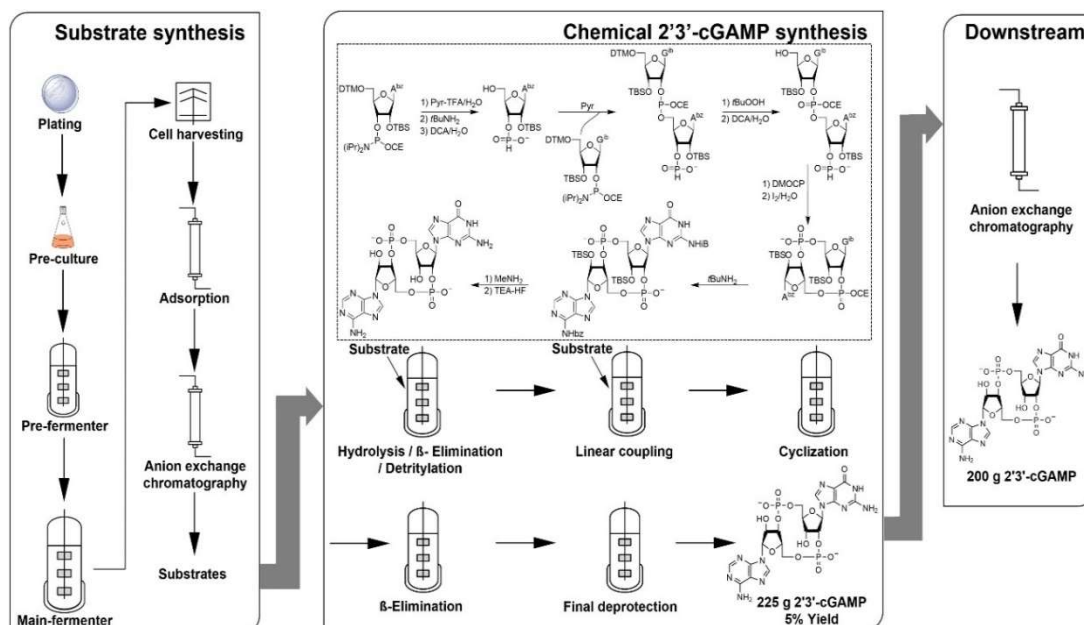
Kolejnym artykułem w cyklu publikacji jest praca [A.6], która powstała w ramach współpracy z zespołem kierowanym przez prof. Katrin Rosenthal z Politechniki w Dortmundzie. Badania dotyczyły oceny środowiskowej bioprocesu produkcji cyklicznych dinukleotydów (2'3'-cGAMP), które znajdują zastosowanie w badaniach i rozwoju immuno-onkologii.

W ostatnich latach opracowano liczne pochodne cyklicznych dinukleotydów (CDN), charakteryzujące się ulepszonymi właściwościami, co stwarza potencjał ich zastosowania w przemyśle farmaceutycznym. CDN są kluczowymi molekułami w biologii komórki, pełniąc funkcje sygnalizacyjne w organizmach eukariotycznych i prokariotycznych, zwłaszcza w odpowiedzi na stres środowiskowy, infekcje i inne stany patologiczne. W szczególności, pochodne CDN wykazują obiecujące właściwości jako czynniki immunomodulujące, wykorzystywane w terapii nowotworowej i chorobach autoimmunologicznych, co stwarza nowe perspektywy w medycynie⁷.

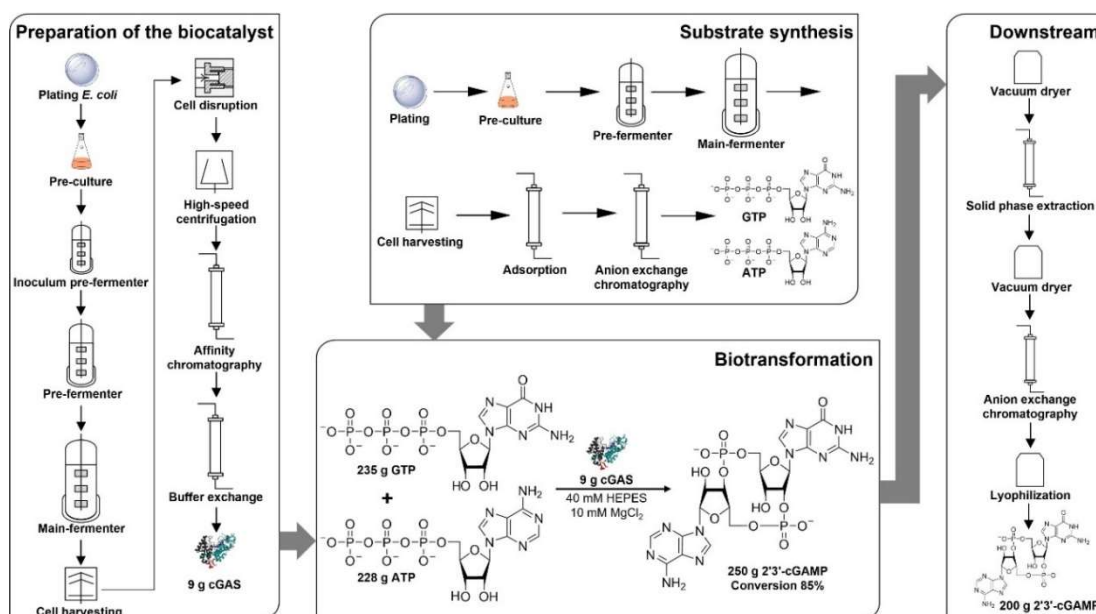
W pracy zaprezentowałam innowacyjne podejście do analizy porównawczej dwóch metod syntezy CDN – biokatalitycznej i chemicznej – w kontekście ich wpływu środowiskowego. Opracowanie nowych, efektywnych metod syntez tych związków jest kluczowe dla ich komercyjnego zastosowania. Schematy obu dróg syntezy prezentuję na rysunkach 5 i 6. Przeprowadzone przeze mnie analizy obejmowały jednostkę funkcjonalną

⁷ Danilchanka O, Mekalanos JJ. Cyclic dinucleotides and the innate immune response. Cell. 2013 Aug 29;154(5):962-970. doi: 10.1016/j.cell.2013.08.014. PMID: 23993090; PMCID: PMC3931520.

równą 200 g produktu oraz zastosowanie podejścia „od bramy do bramy” w ocenie granic systemu. Wyniki badań wykazały, że synteza chemiczna prowadzi do znacznego wzrostu potencjału globalnego ocieplenia i innych kategorii wpływu środowiskowego w porównaniu do biokatalitycznej drogi syntezy, co stanowi nowatorską analizę dla optymalizacji tego typu procesów produkcyjnych.



Rysunek 5. Droga chemicznej syntezy 2'3'-cGAMP.



Rysunek 6. Droga biosyntezy 2'3'-cGAMP.

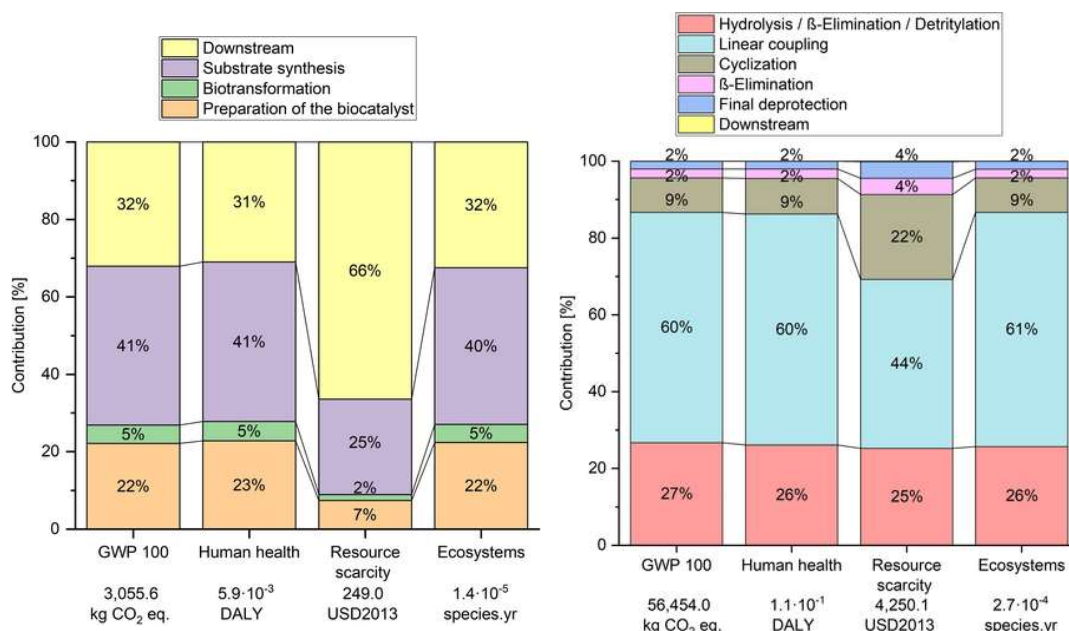
W artykule naukowym [A.7] zaprezentowałam wyniki analizy porównawczej dla syntezy chemicznej oraz biokatalitycznej. Dostępne dane pierwotne, w tym dane laboratoryjne, umożliwiły przeprowadzenie analizy cyklu życia (LCA) dla obu metod syntezy. Jest to pierwsza w literaturze przedmiotu analiza środowiskowa tego typu procesu.

Do analizy wykorzystałam metodę ReCiPe Endpoint. Wyniki w punktach końcowych dla 3 kategorii szkód przedstawiam w Tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki analizy porównawczej z zastosowaniem metodologii ReCiPe.

Method	GWP 100 [kg CO ₂ equiv.]	Human health [DALY]	Resource scarcity [USD2013]	Ecosystems [species yr]	Water use [m ³]
biocatalytic synthesis	3055.6	5.9×10^{-3}	249.0	1.4×10^{-5}	31.88
chemical synthesis	56454.0	1.1×10^{-1}	4250.1	2.7×10^{-4}	482.39
fold-difference	18	19	17	19	15

Uzyskane wyniki wskazują, że synteza biokatalityczna ma znacznie niższy wpływ środowiskowy (3055,6 kg CO₂eq) w porównaniu z syntezą chemiczną (56454 kg CO₂eq). W celu dokładniejszego zrozumienia uzyskanych wyników oraz zidentyfikowania etapów szczególnie krytycznych, wyznaczyłam współczynniki procentowe poszczególnych etapów procesów dla czterech kategorii wpływu: GWP 100, zdrowie człowieka, niedobór zasobów, wpływ na ekosystem, zarówno dla biosyntezy (Rysunek 7a) i syntezy chemicznej (Rysunek 7b). Wyniki pokazują, że w przypadku zubożenia zasobów wpływ procesu biosyntezy jest największy (66%), ze względu na duży udział rozpuszczalników wymaganych do oczyszczenia produktu.



Rysunek 7. Procentowy udział poszczególnych etapów syntezy a) biosyntezy i b) syntezy chemicznej dla 4 kategorii wpływów (potencjał globalnego ocieplenia, wpływ na zdrowie ludzkie, niedobór zasobów i wpływ na ekosystem).

Dodatkowo uzyskane wyniki potwierdzają, że analiza cyklu życia może być skutecznie przeprowadzona również dla procesów w skali laboratoryjnej. Metoda LCA umożliwia identyfikację etapów o najmniejszej efektywności syntezy oraz ocenę potencjalnych możliwości ich optymalizacji. **W przypadku syntezy 2'3'-cGAMP szczegółowo przeanalizowałam możliwość recyklingu rozpuszczalników w syntezie chemicznej oraz ponowne wykorzystanie enzymów w syntezie biokatalitycznej, w celu zaproponowania możliwych ulepszeń.** Redukcję potencjału globalnego ocieplenia (GWP) o 12 % osiągnięto dzięki recyklingowi rozpuszczalników w syntezie chemicznej chemicznej i 20 % redukcję GWP poprzez ponowne wykorzystanie enzymów w syntezie biokatalitycznej. W analizach wskazałam również znaczenie różnych źródeł energii oraz skład miks energetyczny w poszczególnych krajach (Polska, Niemcy, Norwegia). Analizę niepewności przeprowadzono z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo przy 95% poziomie ufności w programie SimaPro. Dla obu dróg syntezy uzyskano odchylenia standardowe w granicach 20-27% we wszystkich kategoriach szkód. W skali przemysłowej odchylenie standardowe często ulega zmniejszeniu ze względu na bardziej zaawansowaną kontrolę procesu, automatyzację oraz standaryzację parametrów produkcji.

Analizy LCA prowadzone we współpracy z ośrodkiem w Dortmundzie były pierwszymi tego typu opracowaniami dla procesów syntezy związków chemicznych w skali laboratoryjnej.

Biokataliza, która wykorzystuje enzymy lub mikroorganizmy do syntezy CDN, oferuje wyższe selektywności oraz łagodniejsze warunki reakcji, co może przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji oraz zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko. Biokatalityczna metoda syntezy CDN przyciąga coraz większą uwagę, szczególnie w kontekście zrównoważonej produkcji, gdyż enzymatyczne reakcje są mniej energochłonne i prowadzą do mniejszych ilości ubocznych produktów. Dodatkowo, biokataliza oferuje możliwość zastosowania łatwo dostępnych surowców naturalnych, co sprawia, że jest bardziej ekologiczna w porównaniu do tradycyjnych procesów chemicznych.

Z kolei synteza chemiczna CDN, mimo swojej szerokiej stosowalności, wiąże się z wyzwaniami związanymi z użyciem agresywnych reagentów i wymaga bardziej skomplikowanych warunków reakcji. Ponadto, procesy chemiczne generują większe ilości odpadów oraz są bardziej energochłonne, co może negatywnie wpływać na środowisko.

Dowodzi to, że analiza LCA na wczesnym etapie badań stanowi skuteczne narzędzie w identyfikacji rozwiązań o najmniejszym negatywnym wpływie na środowisko.

8.5 Analiza Śladu Węglowego dla technologii dystrybucji energii w samolotach o napędzie hybrydowo-elektrycznym

Udział lotnictwa w śladzie węglowym jest niezaprzeczalny. Transport lotniczy odpowiada za emisję około miliarda ton dwutlenku węgla rocznie, a to blisko 2,5% rocznej globalnej antropogenicznej emisji CO₂. Porównując pozostałe środki transportu lotnictwo odpowiada za blisko 12% tej wartości⁸. Wg raportu firmy Airbus do 2040 roku na świecie

⁸ International Air Transport Association (IATA). (2020). *The Role of Aviation in Global Carbon Emissions*. IATA. Link: <https://www.iata.org/en/pressroom/2020/2020-10-06-01/>

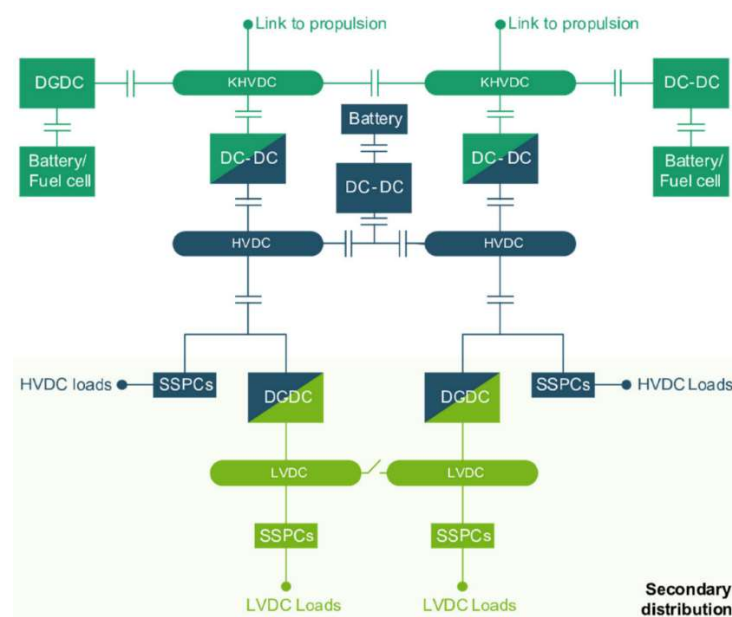
będzie zapotrzebowanie na ok 39000 nowych samolotów⁹. Wspieranie długoterminowych planów środowiskowych, takich jak Flightpath 2050, które zakładają do 2050 roku redukcję emisji CO₂ o 70% na pasażerokilometr oraz 90% redukcję emisji NO_x w całym sektorze lotniczym jest niezwykle istotne w kontekście przyszłego osiągnięcia neutralności klimatycznej. Przeprowadzanie kompleksowej analizy cyklu życia umożliwi określenie śladu węglowego oraz potencjalnych zagrożeń dla środowiska naturalnego, związanych z zastosowaniem nowoczesnych technik produkcji, uwzględniając cały cykl życia systemu „od kołyski aż po grób”. Dodatkowo, rozwijane będą technologie nowej generacji o niskim śladzie węglowym, co stanowi istotny element zrównoważonego rozwoju w przemyśle lotniczym. Implementacja hybrydowych układów napędowych doprowadzi do wzrostu mocy elektrycznej z setek kilowatów do poziomu megawatów w samolotach przyszłości. W artykule naukowym [A.7], opisano możliwość zastosowania analizy cyklu życia (LCA), umożliwiającej precyzyjne określenie śladu węglowego oraz identyfikację potencjalnych zagrożeń dla środowiska naturalnego, wynikających z wdrożenia zaawansowanych technik produkcji samolotów o napędzie hybrydowo-elektrycznym. Analiza ta uwzględnia całociowy cykl życia systemu, od fazy projektowania po utylizację, co stanowi istotny element nowości w zakresie środowiskowej oceny technologii lotniczych. Dystrybucja energii, dla której wykonuję analizy śladu węglowego podzielona jest na trzy główne części w zależności od poziomów napięcia:

KHVDC (Very High Voltage Direct Current): to magistrala przeznaczona głównie do zasilania obciążeń napędowych oraz dystrybucji energii, operująca przy bardzo wysokich napięciach około 800 V.

HVDC (High Voltage Direct Current): to magistrala zaprojektowana do zasilania obciążeń o dużej mocy, początkowo przy napięciu 540 V. Choć nie jest dedykowana do zasilania układów napędowych, pełni funkcję obsługi innych wymagających obciążeń.

LVDC (Low Voltage Direct Current): to magistrala przeznaczona do zasilania konwencjonalnych obciążeń elektrycznych, operująca przy napięciu 28 V (Rysunek 8).

⁹ Airbus. (2020). *Global Market Forecast: 2020-2039*. Airbus. Link: <https://www.airbus.com/>



Rysunek 8. Architektura układu elektrycznego opracowana w ramach projektu HECATE.

Różnice koncepcyjne między tradycyjnymi architekturami systemów dystrybucji elektrycznej a architekturą HECATE opierają się na innowacyjnym podejściu, w którym cały system elektryczny samolotu jest zasilany przez główną magistralę KHVDC. Ta magistrala nie tylko dostarcza energię do napędu, ale również zasila wtórną sieć dystrybucji HVDC za pomocą konwertera DC-DC. Takie nowatorskie rozwiązanie zapewnia wyjątkową wydajność, osiągając najlepsze wskaźniki spośród wszystkich rozważanych konfiguracji. Stanowi to przełomową innowację w architekturach pełno- i hybrydowo-elektrycznych, w których energia może pochodzić z alternatywnych źródeł, takich jak bateria, ogniwo paliwowe lub ich kombinacja. **Omawiany artykuł opisuje metodologię oceny cyklu życia (LCA) dla systemów dystrybucji elektrycznej w przyszłych samolotach hybrydowo-elektrycznych o zasięgu regionalnym, co jest nowatorskim podejściem w kontekście lotnictwa.** Dokonana w artykule analiza zaproponowanego podejścia do obliczania obciążeń środowiskowych kładzie nacisk na podejście cyrkularne, które ma na celu minimalizację wpływu na środowisko poprzez analizę całego cyklu życia systemów elektrycznych, od produkcji po utylizację.

Badania zostały wykonane w ramach projektu o akronimie **HECATE (Hybrid-ElectriC regional Aircraft distribution Technologies)**, który koordynuję na **Politechnice Łódzkiej [P.4]** (Załącznik 5). Projekt ten jest częścią programu HORIZON EUROPE i trwa od stycznia 2023 do grudnia 2025 roku. **Jako kierownik zespołu badawczego na Politechnice Łódzkiej**, sprawuję nadzór nad wszystkimi etapami prac związanych z planowaniem badań, analizą LCA, opracowaniem raportów oraz interpretacją wyników. dotyczą przede wszystkim etapu produkcji, ale także późniejszego użytkowania i utylizacji. Konsorcjum HECATE składa się z kluczowych partnerów przemysłowych zajmujących się dystrybucją energii elektrycznej w samolotach, w tym liderów rynku producentów samolotów (Airbus, Collins Aerospace, Safran), którzy współpracują z wiodącymi ośrodkami badawczymi, uniwersytetami oraz kluczowymi małymi i średnimi przedsiębiorstwami z Unii Europejskiej. Projekt realizowany jest zgodnie z zasadami

gospodarki o obiegu zamkniętym, wykorzystując analizę cyklu życia (LCA) do oceny całego systemu elektrycznego oraz technologii dystrybucji i konwersji energii.

Oczekuje się, że wyniki projektu HECATE będą miały istotny wpływ na rozwój rozwiązań w zakresie kontrolowania i zapobiegania zanieczyszczeniom w sektorze lotniczym. W nadchodzących latach przewiduje się znaczący wzrost emisji związany z dynamicznym rozwojem rynku lotniczego i kosmicznego.

Innowacyjność moich badań w ramach projektu HECATE polega na dostarczeniu zaawansowanych narzędzi wspierających zespoły projektowe w analizie wpływu systemów elektrycznych na środowisko. Zastosowanie analizy cyklu życia (LCA) jako kluczowego narzędzia pozwala na optymalny wybór komponentów systemów elektrycznych, uwzględniając ich wpływ na ekosystem. Dodatkowo, analizy w ramach LCA w projekcie HECATE umożliwią dalszy rozwój metod oceny oddziaływania samolotów hybrydowo-elektrycznych na środowisko, które w nadchodzących dziesięcioleciach będą stanowiły istotny element zrównoważonego rozwoju w lotnictwie.

Pomimo zaawansowanego etapu analiz środowiskowych realizowanych w projekcie HECATE, ze względu na obowiązującą umowę o zachowaniu poufności, ostateczne wyniki prac na obecnym etapie projektu nie mogą być publicznie udostępnione.

8.6 Zastosowanie analizy cyklu życia w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym, znana również jako gospodarka cyrkularna, to model produkcji i konsumpcji oparty na dzieleniu się, pożyczaniu, ponownym użyciu, naprawie, odnawianiu i recyklingu istniejących materiałów i produktów przez jak najdłuższy czas. W ten sposób wydłuża się cykl życia produktów, a jednocześnie minimalizuje powstawanie odpadów. Głównym celem gospodarki cyrkularnej jest unikanie zjawiska downcyclingu, które polega na utracie wartości przetwarzanego materiału. W związku z tym gospodarka o obiegu zamkniętym obejmuje szerszy zakres działań niż tradycyjny recykling. Model ten stwarza znaczące możliwości i nadzieje na radykalną transformację gospodarczą i społeczną. Ponowne wykorzystanie i recykling produktów spowalnia eksploatację zasobów naturalnych, ogranicza degradację krajobrazu i siedlisk oraz wspomaga ochronę bioróżnorodności. Dodatkową korzyścią wynikającą z wdrożenia gospodarki o obiegu zamkniętym jest redukcja rocznej emisji gazów cieplarnianych. Zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska, procesy przemysłowe oraz użytkowanie produktów odpowiadają za 9,1% emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej, podczas gdy gospodarka odpadami generuje 3,3% tych emisji. Około dwóch trzecich światowych emisji gazów cieplarnianych pochodzi ze spalania paliw kopalnych wykorzystywanych do produkcji energii cieplnej i elektrycznej, a także w transporcie i przemyśle. Najnowszy raport IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ostrzega, że niepowodzenie w ograniczeniu emisji będzie miało katastrofalne skutki zdrowotne, gospodarcze i społeczne na całym świecie. Istnieje jednak możliwość przeciwdziałania tym zmianom poprzez ograniczenie emisji i inwestowanie w strategie adaptacyjne. Zwiększanie świadomości społecznej na temat rzeczywistego wpływu zmian klimatycznych na życie i zdrowie ludzi jest kluczowe. Jednym z działań, które może przyczynić się do wzrostu

świadomości, jest upowszechnianie wiedzy na temat analiz cyklu życia i obciążeń środowiskowych.

Szacuje się, że ponad 80% wpływu produktu na środowisko jest określone już na etapie jego projektowania. Z tego względu przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym wymaga przemyślenia sposobu, w jaki już w fazie koncepcyjnej, a następnie w każdym etapie łańcucha produkcji, użytkowania i dostaw można wydłużyć cykl życia produktów.

Dotychczas zrealizowane przeze mnie prace naukowo-badawcze stanowią integralną część koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym. Zagadnienie powiązania gospodarki o obiegu zamkniętym z ideą zrównoważonego rozwoju oraz zastosowaniem analizy cyklu życia zostało szczegółowo omówione i podsumowane w artykule przeglądowym, którego jestem współautorką [A.8]. Artykuł prezentuje przegląd aktualnej literatury na temat zastosowania analizy cyklu życia (LCA) w redukcji obciążeń środowiskowych, opierając się na 83 pozycjach naukowych. W ramach tego przeglądu zaprezentowane zostały studia przypadków, które ilustrują zastosowanie LCA w różnych gałęziach przemysłu, takich jak przemysł biochemiczny, spożywczy, energetyka, transport, budownictwo oraz sektor elektroniczny. Zastosowanie LCA w tych obszarach stanowi innowacyjne podejście do minimalizacji negatywnego wpływu produkcji na środowisko, szczególnie w kontekście wdrażania alternatywnych surowców, metod syntezy oraz technologii redukujących obciążenia ekologiczne.

W artykule szczególną uwagę poświęciłam metodologii LCA oraz jej potencjale w ocenie zagrożeń środowiskowych, takich jak zużycie zasobów, zmiany klimatyczne, eutrofizacja czy utrata bioróżnorodności. Ponadto, zaprezentowane zostało podejście „od kołyski do kołyski” (ang. "cradle to cradle", C2C), które pozwala na ocenę cyklu życia produktów, usług i procesów w kontekście ich środowiskowego wpływu, uwzględniając sposoby ograniczenia powstawania odpadów. Przegląd wskazuje na znaczenie gospodarki cyrkularnej, która może przyczynić się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych nawet o 20%, stanowiąc kluczowe narzędzie w walce z kryzysem klimatycznym.

Artykuł podkreśla również rolę wdrażania nowatorskich technologii, które mają na celu zmniejszenie obciążenia środowiskowego oraz poprawę efektywności procesów produkcyjnych. Wskazuje na konieczność zwiększenia świadomości społecznej oraz edukacji w zakresie zrównoważonego rozwoju, co stanowi fundament skutecznej transformacji gospodarczej. Dodatkowo, zwraca uwagę na potrzebę zwiększenia współpracy między sektorami, co umożliwi bardziej kompleksowe podejście do innowacji. Wprowadzenie bardziej restrykcyjnych polityk oraz regulacji, które będą wspierać zrównoważony rozwój i promować praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym, jest kluczowe dla zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów i zapewnienia zrównoważonej przyszłości.

9. Podsumowanie

Zrealizowane przeze mnie badania w obszarze analiz środowiskowych ukazują kluczowe znaczenie zastosowania analizy cyklu życia (LCA) jako narzędzia wspierającego projektowanie nowych procesów oraz technologii. Wyniki badań zaprezentowane w publikacjach dowodzą, że właściwy dobór modeli środowiskowych, precyzyjne

określenie granic systemu, odpowiednia definicja jednostki funkcjonalnej oraz skrupulatna akwizycja danych umożliwiają efektywne zastosowanie metodologii LCA do oceny obciążeń środowiskowych związanych z różnorodnymi procesami technologicznymi. Integracja tych analiz z analizą kosztów cyklu życia (ang. Life Cycle Cost, LCC) pozwala na identyfikację kluczowych punktów krytycznych i wskazanie obszarów, w których możliwe jest wdrożenie działań zmierzających do ich eliminacji lub optymalizacji, co sprzyja zrównoważonemu projektowaniu i zarządzaniu produktami, systemami, technologiami oraz usługami.

Nowatorski charakter moich badań polega na opracowaniu zaawansowanych modeli środowiskowych, które umożliwiają kompleksową ocenę obciążeń ekosystemów związanych z procesami technologicznymi w różnych sektorach przemysłu. Zastosowanie tych modeli w analizie wpływu parametrów produkcyjnych, takich jak emisja CO₂, przyczynia się do istotnego ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko. **Badania te wniosły cenny wkład w określenie czynników determinujących ślad węglowy analizowanych procesów produkcyjnych, co umożliwiło identyfikację obszarów, w których wdrożenie innowacyjnych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych może prowadzić do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych.** Redukcja śladu węglowego w badanych sektorach ma kluczowe znaczenie zarówno z perspektywy zrównoważonego rozwoju, jak i długoterminowej konkurencyjności przemysłu.

Opracowane analizy dostarczyły praktycznych wskazówek wspierających podejmowanie decyzji opartych na zrównoważonym podejściu do procesów produkcyjnych. Wyniki moich badań mają istotne znaczenie nie tylko dla rozwoju teorii w obszarze analiz środowiskowych, ale także dla praktyki inżynierskiej.

Ponadto, przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie i doskonalenie metodyk obliczania śladu węglowego, co pozwoliło na stworzenie jednolitych ram oceny, umożliwiających porównywalność oraz przejrzystość uzyskanych wyników.

Opisane w punkcie 9 osiągnięcia były zrealizowane w ramach następujących projektów badawczych:

[P.1] 02.2015 - 01.2018 INREP „Towards Indium free TCOs” – (HORIZON 2020) Wykonawca (nadzór and całością prac związanych z planowaniem badań, analizą i interpretacją wyników LCA) <https://doi.org/10.3030/641864>

[P.2] 09.2019 - 08.2023 HIPERION „Hybrid Photovoltaics for Efficiency Record Using Integrated Optical Technology” (HORIZON 2020) Wykonawca (nadzór and całością prac związanych z planowaniem badań, analizą i interpretacją wyników LCA) <https://doi.org/10.3030/857775>

[P.3] 01.2021-12.2023 Fibre4Yards „Fibre composite manufacturing technologies FOR the automation and modular construction in shipYARDS” (HORIZON 2020) Wykonawca (nadzór and całością prac związanych z planowaniem badań, analizą i interpretacją wyników LCA) <https://doi.org/10.3030/101006860>

[P.4] 01.2023-12.2025 HECATE “Hybrid-ElectriC regional Aircraft distribution Technologies”- (HORIZON EUROPE) Kierownik zespołu badawczego na Politechnice

Łódzkiej (nadzór and całością prac związanych z planowaniem badań analizie i interpretacji wyników) <https://doi.org/10.3030/101101961>

10. Omówienie merytoryczne pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych z okresu całej kariery zawodowej

10.1 Monitoring i badania jakości wód powierzchniowych

Od początku mojej działalności naukowej interesowałam się zagadnieniami związanymi z modelowaniem matematycznym, monitoringiem oraz oceną jakości wód powierzchniowych. Tematyka ta była przedmiotem moich badań początkowo na Uniwersytecie Łódzkim, gdzie w Katedrze Biofizyki Środowiska, pod kierunkiem prof. dra hab. Wirgiliusza Dudy, realizowałam pracę magisterską pt. „Ocena zawartości chlorofenoli i ich pochodnych w wodach wodociągowych”. Celem pracy było zbadanie dynamiki zmian zawartości materii organicznej w wodach rzek Wisły i Pilicy oraz stężeń fenolu, chlorofenoli, gwajakolu, chlorowanych gwajakoli oraz chlorokatecholi zarówno w wodzie surowej (rzecznej), jak i wodzie uzdatnionej (wodociągowej). W ramach pracy określiłam zależności pomiędzy zawartością materii organicznej i prekursorów fenolowych w wodach rzecznych a obecnością fenolu, chlorowanych fenoli i ich pochodnych w wodzie uzdatnionej do picia.

Podczas studiów magisterskich, w semestrze zimowym roku akademickiego 2008/2009, odbyłam wyjazd do Portugalii w ramach wymiany studenckiej ERASMUS. Na Uniwersytecie w Evorze ukończyłam kurs „Biochemia”, pod merytoryczną opieką prof. Celii Antunes.

Następnie w 2009 roku rozpoczęłam studia doktoranckie na Politechnice Łódzkiej, na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska. W 2014 roku pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Ireneusza Zbicińskiego obroniłam z wyróżnieniem rozprawę doktorską pt. „**Analysis of the flux of biogenic substances in the dam reservoir on the example of Sulejow Reservoir**”.

W ramach pracy doktorskiej przeprowadziłam kompleksową analizę zagadnień związanych z potencjałem ekologicznym wód Zalewu Sulejowskiego, która wymagała podejścia multidyscyplinarnego. Obejmuje ono nie tylko podstawowe techniki inżynierii środowiska, ale także zastosowanie metod matematycznych do prognozowania wielkości i zasięgu oddziaływania źródeł emisji oraz kontroli jakości wód. Na stan zasobów wodnych oraz retencję w Polsce wpływa wiele czynników, z których najistotniejsze są uwarunkowania fizjograficzne. Obecnie procesy rozwoju i transformacji ekosystemów wodnych zachodzą szybko, co wynika nie tylko z czynników naturalnych, takich jak procesy geologiczne i zmiany klimatyczne, ale również z dominujących czynników antropogenicznych. Do globalnych procesów, które w ostatnich dziesięcioleciach uległy znacznemu przyspieszeniu, należy eutrofizacja¹⁰. Zjawisko to, definiowane jako wzbogacanie wód w substancje biogenne (głównie azot i fosfor), prowadzi do masowego rozwoju roślinności wodnej. Płytkie, polimiktyczne zbiorniki wód słodkich, takie jak Zbiornik Sulejowski (województwo łódzkie), są szczególnie narażone na negatywne skutki

¹⁰ Dojlido J.: Chemia wód powierzchniowych, Białystok. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko.1995.

eutrofizacji. Zbiornik ten, od momentu swojego powstania (1969-1973), zмага się z problemem złego stanu ekologicznego, co skutkuje niebezpiecznymi dla zdrowia zakwitami wód, wywołanymi przez rozwój glonów. Zjawisko to ogranicza możliwość rekreacyjnego wykorzystania akwenu, zmniejsza jego potencjał oraz atrakcyjność, generując nie tylko negatywne skutki środowiskowe, ale również gospodarczo-ekonomiczne. Najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na degradację Zbiornika Sulejowskiego są niedostateczna sanitacja pobliskich gmin, spływy obszarowe z terenów rolniczych, a także niekorzystne cechy hydromorfologiczne akwenu. Te uwarunkowania prowadzą do deponowania związków biogenych, co w konsekwencji skutkuje stopniową eutrofizacją oraz występowaniem okresowych zakwitów sinic.

Aby uzyskać pełen obraz stanu hydrodynamiki wód Zalewu Sulejowskiego, w pracy doktorskiej przeprowadziłam obliczenia przy użyciu metod CFD (ang. Computational Fluid Dynamics), dotyczące hydrodynamiki przepływu w zbiorniku w stanie ustalonym. Obliczenia uwzględniały średnie warunki hydrodynamiczne i meteorologiczne dla każdego miesiąca badanego roku. Uzyskane wyniki zostały następnie zweryfikowane na podstawie pomiarów terenowych.

Dzięki zastosowaniu oprogramowania WASP (Water Analysis Simulation Program, Agencja Ochrony Środowiska, USA)¹¹, do którego dane hydrodynamiczne zostały dostarczone przez opracowany własny model CFD, wykonałam obliczenia rozkładu temperatury, prędkości przepływu oraz stężeń symulowanych wskaźników jakości wody, takich jak: tlen rozpuszczony, biochemiczne i chemiczne zapotrzebowanie na tlen, stężenie fosforanów, azotanów, azotu amonowego oraz liczebność fitoplanktonu. Wyniki te potwierdzają eutroficzny stan wód w Zbiorniku Sulejowskim.

Zweryfikowany model umożliwił mi wyznaczenie obszarów o najwyższej kumulacji składników biogenych, co pozwoliło na identyfikację miejsc szczególnie narażonych na rozwój zakwitów sinicowych. Opracowany i zweryfikowany model może być zastosowany w procesie budowania strategii kontroli jakości wód oraz sterowania jakością środowiska wodnego w tym zbiorniku. Ponadto, model ten umożliwia ilościową ocenę wpływu różnych źródeł emisji zanieczyszczeń na stan zagrożenia w wybranych punktach lub fragmentach badanego akwenu. Uzyskane wyniki mogą również wspomóc podejmowanie decyzji dotyczących zmian w gospodarce wodnej zbiornika, w odpowiedzi na zmieniającą się presję antropogeniczną.

W trakcie studiów doktoranckich brałam udział w europejskim projekcie o akronimie **WATEPRAXIS** pt. „From theory and plans to eco-efficient and sustainable practices to improve the status of the Baltic Sea” (2007-2013, Interreg IVB Baltic Sea Region Programme) (Załącznik 5). Projekt WATERPRAXIS był finansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Regionu Morza Bałtyckiego 2007-2013 i stanowił część europejskiego Programu Ochrony Bałtyku. Celem projektu było rozwijanie dobrych praktyk w zakresie gospodarki wodnej, a także opracowanie planów działań i środków ochrony wód dla wybranych obiektów pilotażowych w regionie Morza Bałtyckiego, w celu

¹¹ Ambrose, R. B., Wool, T. A., & Martin, J. L. (1993). WASP5 and HSPF: User's Manual for WASP5.1, Water Quality Analysis Simulation Program, and Hydrological Simulation Program—Fortran. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. <https://www.epa.gov/ceam/wasp-water-quality-analysis-simulation-program>

osiągnięcia założeń środowiskowych Ramowej Dyrektywy Wodnej (2000/60/WE). Główne cele projektu obejmowały wdrożenie efektywnych metod ograniczenia emisji zanieczyszczeń do wód powierzchniowych w krajach nadbałtyckich, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki eutrofizacji.

W ramach projektu WATERPRAXIS zidentyfikowano konieczność poprawy obecnych praktyk w zakresie gospodarki wodnej oraz zaproponowano wprowadzenie istotnych zmian. W związku z tym, **w opracowanym przeze mnie raporcie, przygotowałam ulepszone plany działania w zakresie gospodarki wodnej oraz opracowałam zestaw planów inwestycyjnych dla wybranych działań na obszarze pilotażowym.** Temat ten został podjęty w publikacji [B.1], w której przedstawiam aktualny stan wód zbiornika Sulejowskiego oraz proponuję plany naprawcze, opracowane na podstawie referencyjnej metody - Matrix of pressures and impacts for the Sulejów Artificial Reservoir.

[B.1] A. Ziemińska-Stolarska, I. Zbiciński, I. Imbierowicz, J. Skrzypski, Waterpraxis as a tool supporting protection of water in the Sulejow Reservoir, Desalination and Water Treatment Journal, 2013, 51 (19-21) pp4194-4206 DOI:10.1080/19443994.2013.768043.

IF: 0,987

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2013: 20 (obecnie 100)

Liczba cytowań:11

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych badawczych, kwerenda bibliograficzna, wizualizacja i prezentacja danych, przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu i korekta ostatecznej wersji, opracowanie map, tabel i rycin, pierwszy autor, autor korespondencyjny, nadzór nad całością prac związanych z przygotowaniem wyników badań naukowych do publikacji.

Na podstawie opracowanej metodyki, wytypowano odpowiedni obszar oraz zakres inwestycji, które zostały sfinansowane w ramach projektu. Przygotowana została dokumentacja techniczno-finansowa inwestycji dotyczącej budowy sieci kanalizacyjnej w miejscowości Zarzęcin (gmina Mniszków), która posłużyła jako podstawa do przygotowania wniosków aplikacyjnych o dofinansowanie z funduszy strukturalnych.

W ten sposób wyniki projektu miały istotny wpływ na poprawę sytuacji sanitarnej w gminie, przyczyniając się do zmniejszenia presji środowiskowej na wody Zbiornika Sulejowskiego.

Doświadczenia zdobyte podczas realizacji grantu podsumowanie oraz pracy doktorskiej zostały także wykorzystane w ramach innych projektów europejskich, koncentrujących się na tej samej tematyce. Przykładem jest projekt **Baltic Impulse – „Saving the Baltic Sea Waters: Reducing Pollution; Eutrophication in The Baltic Sea” (01.2102-12.2013)** (Załącznik 5). Głównym celem tego projektu była promocja wyników badań uzyskanych w ramach projektu WATERPRAXIS oraz szeroka wymiana doświadczeń między konsorcjami realizującymi inne projekty badawcze skupiające się na obszarze regionu Morza Bałtyckiego. W ramach Klastra uczestniczyłam w dwóch spotkaniach, na których zaprezentowałam wyniki grantu WATERPRAXIS (20-21.11.2012 w Helsinkach,

16.04.2013 w Berlinie) oraz przygotowałam raport końcowy podsumowujący aktywność Politechniki Łódzkiej w tym projekcie.

W okresie od stycznia 2015 r. do kwietnia 2016 r. brałam udział jako wykonawca w europejskim projekcie naukowo-badawczym o akronimie **MONSUL**, zatytułowanym **„Analiza czynników wpływających na stan ekologiczny wód Zbiornika Sulejowskiego w oparciu o ciągły monitoring i zintegrowany model 3D zbiornika”**, realizowanym w ramach Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego 2009-2014 (Fundusze Norweskie) (Załącznik 5). Głównym celem tego projektu było poprawienie jakości informacji o stanie środowiska w zlewni Zbiornika Sulejowskiego, w tym ocena stanu ekologicznego wód, identyfikacja czynników wpływających na ich jakość oraz prognozowanie trendów wpływających na jego potencjał ekologiczny. Projekt zakładał opracowanie zintegrowanego programu monitoringu wód zbiornika, wykorzystującego najnowocześniejsze technologie oraz zaawansowane narzędzia komputerowe do monitorowania i modelowania w technologii 3D. Realizowany w ramach projektu MONSUL program monitoringu składał się z trzech wzajemnie powiązanych platform badawczych:

- a) **Systemu monitoringu stacjonarnego**, zainstalowanego na boi zakotwiczonej w rejonie tamy w Smardzewicach,
- b) **Pływającego systemu pomiarowego**, opartego na sondzie EXO2,
- c) **Systemu pomiarów off-line**, obejmującego badania próbek wody pobranych ze zbiornika i analizowanych w warunkach laboratoryjnych.

Badania przeprowadzono w ramach dwóch sezonów monitoringowych trwających od maja do października 2015 roku oraz od kwietnia do listopada 2016 roku. Wyniki badań zaprezentowano i oryginalnych, pełno tekstowych artykułach naukowych [B.2, B.3,B.4].

a) system badawczego monitoringu stacjonarnego

System monitoringu stacjonarnego składał się z sondy zamontowanej na boi, zakotwiczonej w okolicach tamy w Smardzewicach, posiadającej 7 czujników pozwalających na ciągły, automatyczny pomiar następujących parametrów badanej wody: temperatura, pH, stężenie tlenu rozpuszczonego w wodzie, konduktywność, stężenie chlorofilu, stężenie alg (blue-green algae, BGA) i stężenie jonu amonowego. Urządzenie to było wyposażone także w czujnik meteorologiczny mierzący w trybie ciągłym: temperaturę i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru, ciśnienie atmosferyczne oraz nasłonecznienie. Sonda pomiarowa była zanurzona w wodzie na głębokość ok. 3 m. Lokalizację stacjonarnego systemu pomiarowego i fotografię sondy EXO2 przedstawiono na rysunku 9.

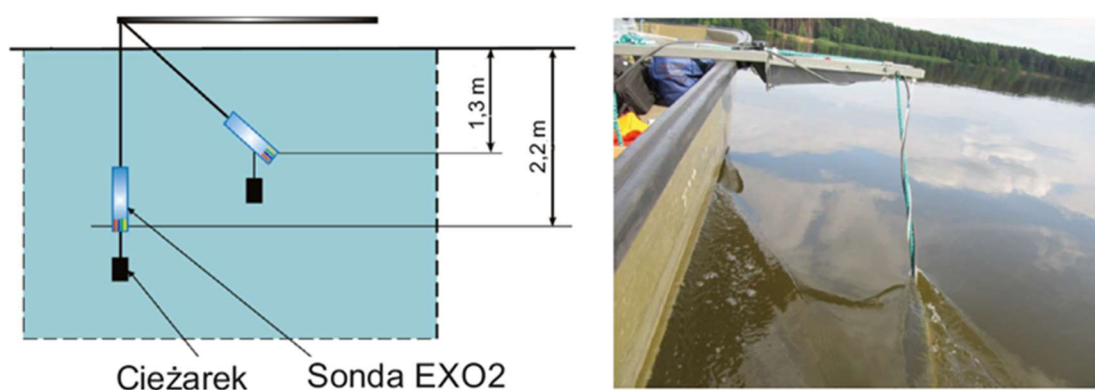


Rysunek 9. Lokalizacja i fotografia stacjonarnego systemu pomiaru parametrów jakości wody oraz danych meteorologicznych, zainstalowanego na Zalewie Sulejowskim.

b) system badawczego monitoringu mobilnego

Mobilny system pomiarowy składał się z sondy pomiarowej EXO2, o której mowa powyżej, oraz modułu GPS umożliwiającego określenie pozycji sondy w momencie pomiaru. System ten był montowany na łodzi motorowej, co pozwalało na przepłynięcie całego jeziora w ciągu około 10 godzin oraz przeprowadzenie pomiarów następujących parametrów jakości wody: temperatura, pH, stężenie tlenu rozpuszczonego, konduktywność, stężenie chlorofilu, oraz stężenie jonów amonowych. Dane pomiarowe uzyskane w trakcie przepływu, wzbogacone o czas i lokalizację pomiaru (zgodnie z systemem GPS), były gromadzone w pamięci podręcznej przenośnego dataloggera, z którego następnie były przesyłane na komputer PC.

Dotychczas w literaturze przedmiotu nie przeprowadzono badań dotyczących zastosowania sond wieloparametrowych w pomiarach mobilnych. W celu umożliwienia pomiarów w przepływie skonstruowano specjalną „ławę z wysięgnikiem”, montowaną na łodzi motorowej. Schemat montażu sondy oraz fotografia wykorzystywanego systemu pomiarowego zostały przedstawione na rysunku 10.

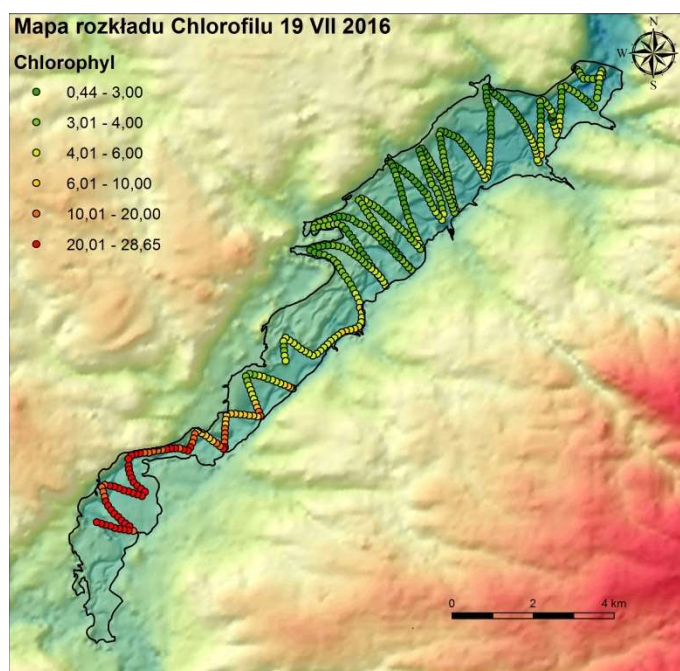


Rysunek 10. Schemat i fotografia mobilnego systemu do pomiarów monitoringowych.

W celu minimalizacji błędów pomiarowych, przeprowadzono wstępne badania mające na celu określenie optymalnych warunków dla pomiarów mobilnych. Celem tych badań kontrolnych była ocena wpływu prędkości poruszania się łodzi, używanej do holowania sondy pomiarowej oraz głębokości zanurzenia sondy na wyniki pomiarów i wiarygodność uzyskanych danych. W ramach tych prac kontrolnych wykonano pomiary siedmiu parametrów jakości wody podczas przepływu łodzią po Zalewie Sulejowskim przy prędkościach 5,5–6 km/godz. oraz 9,0–9,5 km/godz., a także przeprowadzono pomiary przy użyciu nieruchomej sondy zanurzonej na głębokościach $h = 3,5$ m oraz $h = 1,5$ m.

Z analizy statystycznej wynika, że jeżeli prędkość łodzi holującej sondę nie przekraczała wartości 6 km/godz., to wyniki pomiarów parametrów jakości wody, wykonanych za pomocą sondy holowanej przy tej prędkości, nie różniły się istotnie od wyników uzyskanych przy użyciu sondy nieruchomej. Analiza wykazała również, że zmniejszenie głębokości zanurzenia sondy EXO2 z 3,5 m do 1,5 m nie miało istotnego wpływu na wyniki pomiarów.

Dzięki zastosowanej metodologii pomiarów mobilnych, uzyskano dane o stanie jakości wody w 650–700 punktach zlokalizowanych na całym obszarze Zalewu Sulejowskiego. Przykład zbioru takich danych pomiarowych, uzyskanych podczas przepływu łodzią po zalewie, przedstawiono na rysunku 11. Dane te dotyczą zmierzonych stężeń chlorofilu w dniu 19.07.2016 r.



Rysunek 11. Profil zmian stężenia chlorofilu ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) na obszarze Zalewu Sulejowskiego, uzyskany za pomocą mobilnego systemu pomiarowego w dniu 19.07.2016 r.

c) metodyka badań laboratoryjnych

Trzeci z wymienionych systemów pomiarowych – system pomiarów off-line – opierał się na analizie laboratoryjnej próbek wody pobranych z Zalewu Sulejowskiego. W trakcie przejazdu łodzią po zalewie, zgodnie z trasą przedstawioną na rysunku 15, pobierano próby wody z wybranych punktów, w ilości około 30 próbek. Ponadto, próbki wody były także pobierane z rzeki Pilicy za tamą spiętrzącą w miejscowości Smardzewice, poniżej mostu w Sulejowie oraz z rzeki Luciąży w rejonie miejscowości Przygłów. W pobranych próbkach oznaczono następujące parametry: ChZT, BZT₅, ogólny węgiel organiczny, azot azotanowy (N-NO_3^-) oraz fosforany (PO_4^{3-}). W ramach sezonów pomiarowych, tj. maj-październik 2015 r. oraz kwiecień-listopad 2016 r., pobrano łącznie około 380 próbek wody z Zalewu Sulejowskiego.

Dodatkowo, w ramach uzupełnienia badań monitoringowych, pobrano próbki osadów dennych, które poddano analizie pod kątem zawartości związków biogennych oraz metali ciężkich. Właściwości akumulacyjne osadów dennych sprawiają, że stężenia zanieczyszczeń w nich zgromadzonych mogą być wielokrotnie wyższe niż w samej wodzie. Takie właściwości umożliwiają wykrywanie oraz monitorowanie zmian koncentracji tych substancji nawet przy niskim poziomie zanieczyszczenia wody. Celem przeprowadzonych analiz było zbadanie koncentracji związków biogennych zawartych w osadach dennych Zalewu Sulejowskiego oraz obserwacja dynamiki ich zmian w okresie od października 2016 do lipca 2017 roku. Na podstawie uzyskanych wyników badań sporządzono mapy rozkładu przestrzennego związków biogennych zdeponowanych w osadach Zalewu Sulejowskiego [B.6].

Jako realizator projektu MONSUL uczestniczyłam zarówno w opracowaniu metodyki przejazdów mobilnych, jak również w analizach laboratoryjnych oraz interpretacji uzyskanych wyników badań. Wyniki prac wykonanych w ramach projektu

MONSUL ukazały się w następujących artykułach naukowych, **które stanowią drugie zgłoszone w ramach niniejszego Autoreferatu osiągnięcie naukowe:**

[B.2]. **A. Ziemińska-Stolarska**, M. Imbierowicz, M. Jaskulski, A. Szmidt, I. Zbiciński, Continuous and Periodic Monitoring System of Surface Water Quality of an Impounding Reservoir: Sulejow Reservoir, Poland. International Journal of Environmental Research and PublicHealth, 2019, ISSN:1660-4601, vol. 16, no. 3, pp. 1-17.

IF: 2,849

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2019: 140 (obecnie 20)

Liczba cytowań:5

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych badawczych, kwerenda bibliograficzna, udział w badaniach monitoringowych, wykonanie analiz laboratoryjnych, przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu i korekta ostatecznej wersji, analiza i interpretacja wyników badań, opracowanie tabel i rycin, pierwszy autor, autor korespondencyjny.

[B.3] **A. Ziemińska-Stolarska**, J. Adamiec, M. Imbierowicz, E. Imbierowicz, M. Jaskulski, I. Zbiciński. Surface Water Quality Monitoring in A Large Dam Reservoir, Poland, Desalination and Water Treatment, 2018, ISSN: 1944-3994, vol. 101, pp.130-142.

IF: 1,234

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2018: 20 (obecnie 100)

Liczba cytowań:4

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych badawczych, analiza i interpretacja wyników, kwerenda bibliograficzna, współudział w badaniach monitoringowych, wykonanie analiz laboratoryjnych,, przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu i korekta ostatecznej wersji, pierwszy autor, autor korespondencyjny, nadzór nad całością prac związanych z przygotowaniem wyników badań naukowych do publikacji.

[B.4] **A. Ziemińska-Stolarska**, J. Adamiec, M. Imbierowicz, E. Imbierowicz, M. Jaskulski, A. Szmidt, I. Zbiciński, Online Measurement Method of Water Quality in the Sulejow Reservoir. Ecological Chemistry and Engineering S, 2018, ISSN: 1898-6196, vol. 25, no. 1, pp. 89-100.

IF: 1,467

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2018: 15 (obecnie 40)

Liczba cytowań:1

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych badawczych, analiza i interpretacja wyników, kwerenda bibliograficzna, współudział w badaniach monitoringowych, wykonanie analiz laboratoryjnych,, przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu i korekta ostatecznej

wersji, pierwszy autor, autor korespondencyjny, nadzór nad całością prac związanych z przygotowaniem wyników badań naukowych do publikacji.

[B.5] A. Ziemińska-Stolarska, M. Kempa. Modeling and Monitoring of Hydrodynamics and Surface Water Quality in the Sulejow Dam Reservoir, Poland, 2021, ISSN: 2073-4441, vol. 13, no. 3, pp.1-19.

IF: 3,53

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2021: 100 (obecnie 100)

Liczba cytowań: 10

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie koncepcji pracy; opracowanie przeglądu literaturowego, opracowanie metodyki pomiaru zmiennych ekologicznych Zbiornika Sulejowskiego (rozkład temperatury, prędkości przepływu, stężenia wybranych wskaźników, np. fosforanów, azotanów, fitoplanktonu) za pomocą trójwymiarowego modelu hydrodynamicznego GEMSS-HDM oraz modelu jakości wody WASP EUTRO, wykonanie pomiarów hydrodynamiki w Zalewie Sulejowskim oraz pomiarów fizyko-chemicznych z wykorzystaniem sond wieloparametrowych, redagowanie tekstu manuskryptu i redagowanie ostatecznej wersji artykułu po poprawkach recenzenckich; opracowanie części ilustracyjnej, autor korespondencyjny.

[B.6] A. Ziemińska-Stolarska, M. Imbierowicz, M. Jaskulski, A. Szmidt, Assessment of the Chemical State of Bottom Sediments in the Eutrophied Dam Reservoir in Poland. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020, 17, 3424.

IF: 3,39

Lista ministerialna czasopism punktowanych 2020: 140 (obecnie 20)

Liczba cytowań: 9

Udział merytoryczny: sformułowanie problemu badawczego i hipotezy badawczej, konceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie, przygotowanie i opracowanie danych badawczych, analiza i interpretacja wyników, kwerenda bibliograficzna, przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu i korekta ostatecznej wersji, pierwszy autor, autor korespondencyjny, nadzór nad całością prac związanych z przygotowaniem wyników badań naukowych do publikacji.

10.2 Reaktor do namnażania komórek macierzystych

Obecnie komórki macierzyste najczęściej hodowane są w sterylnych, jednorazowych naczyniach hodowlanych, takich jak butelki wykonane z polistyrenu, w których oczekują na przekształcenie w preparat leczniczy. Proces ten jest czasochłonny oraz materiałochłonny. W związku z tym, wyzwaniem technologicznym, które ma na celu podniesienie konkurencyjności procesu, jest konstrukcja bioreaktora, który umożliwi:

- **Skrócenie procesu namnażania**, ponieważ komórki macierzyste stają się niestabilne po około 14 dniach. Aby zachować ich optymalne właściwości, konieczne jest

poszukiwanie rozwiązań umożliwiających skrócenie czasu namnażania, co w rezultacie pozwala na zmniejszenie pracochłonności oraz materiałochłonności produkcji.

- **Minimalizowanie ryzyka zanieczyszczenia preparatu** komórek macierzystych, aby nie obniżyć jego jakości ani nie spowodować zniszczenia na skutek skażenia.
- **Automatyzację procesu hodowli**, co pozwala na lepsze sterowanie warunkami hodowli, w tym temperaturą oraz atmosferą panującą w bioreaktorze.

Zgodnie z aktualnym stanem techniki, stosowane technologie namnażania obejmują cieplarki i laminarki, które wiążą się z istotnym ryzykiem, o którym wspomniano powyżej. Zastosowanie bioreaktora w procesie hodowli komórek macierzystych pozwala na zwiększenie wydajności namnażania oraz bezpieczeństwa mikrobiologicznego, a także zmniejszenie pracochłonności i materiałochłonności całego procesu hodowli, co w efekcie prowadzi do redukcji kosztów w porównaniu do obecnie stosowanych technologii¹².

W okresie od 1 lutego 2020 roku do 30 listopada 2023 roku **pełniłam funkcję kierownika zespołu badawczego na Politechnice Łódzkiej**, który uzyskał finansowanie w ramach projektu Centrum Obsługi Przedsiębiorcy. **Projekt, zatytułowany „Prace B+R związane z zaprojektowaniem, budową reaktora i wkładów do produkcji komórek macierzystych” (Nr umowy RPLD 01.02.02-10-0027/19)**, realizowany był w ramach Osi Priorytetowej 1 „Badanie, rozwój i komercjalizacja wiedzy” (Załącznik 5). Celem projektu była budowa prototypu bioreaktora do ciągłego namnażania komórek macierzystych, a założona w tym celu spółka **AKRIMTECH Sp. z o.o.** podejmuje działania mające na celu realizację tego zadania.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwolą na ocenę możliwości znacznego postępu w zwiększeniu dostępności do leczenia z wykorzystaniem komórek macierzystych, a także na obniżenie kosztów tych zabiegów oraz skrócenie czasu oczekiwania na gotowy preparat. W ramach realizacji projektu, spółka AKRIMTECH nawiązała współpracę z zespołem kierowanym przez prof. dr hab. n. med. Ireneusza Majsterka, kierownika Katedry oraz Zakładu Chemii i Biochemii Medycznej, a także kierownika MOLEcoLAB – Centrum Badań Molekularnych Chorób Cywilizacyjnych. Dodatkowo, zespół badawczy, którym kierowałam, odbywał konsultacje z prof. dr hab. n. med. Marcinem Majką, ekspertem w zakresie biologii komórek macierzystych.

W ramach wspomnianego projektu, **pełniłam rolę kierownika zespołu badawczego oraz przeprowadziłam analizę śladu węglowego dla prototypu bioreaktora oraz wkładów przeznaczonych do namnażania komórek macierzystych**. Analizy obejmowały cykl życia, począwszy od pozyskania materiałów, aż do produkcji bioreaktora. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano dane pochodzące z bazy danych Ecoinvent, a szczegółowy opis danych oraz ich źródła został przedstawiony w tabeli inwentarzowej [Tabela 6].

Bioreaktor SteeMore został zaprojektowany do pracy z wkładami hodowlanymi, przeznaczonymi do pracy w układzie ciągłym. W ramach analiz środowiskowych uwzględniono wkład typu hollow-fiber, który jest wkładem membranowym, w którym

12 Hussen, B. M., Taheri, M., Yashooa, R. K., Abdullah, G. H., Abdullah, S. R., Kheder, R. K., & Mustafa, S. A. (2024). Revolutionizing medicine: Recent developments and future prospects in stem-cell therapy. *International Journal of Surgery*, 110(12), 8002-8024. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000002109>. PMID: 39497543; PMCID: PMC11634165

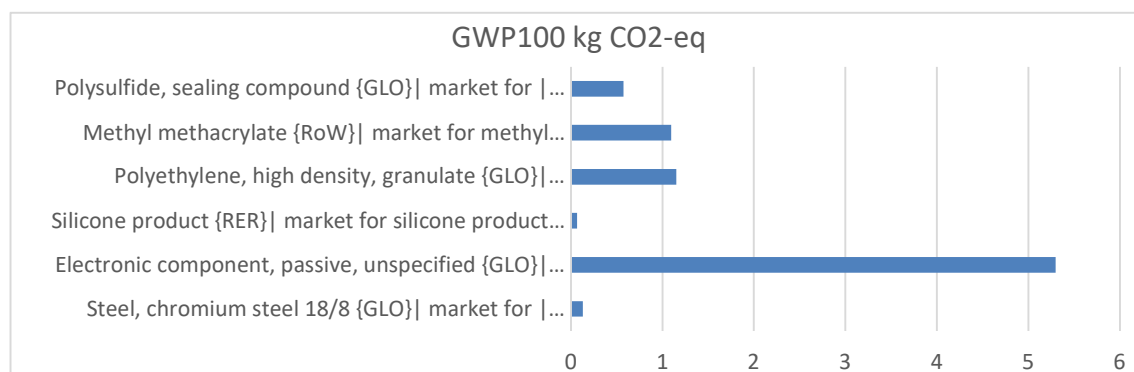
proces wzrostu komórek odbywa się na zewnętrznej powierzchni kapilar. Kapilary, wykonane z przepuszczalnego polisulfonu, symulują funkcję ludzkich naczyń włosowatych. Pożywka hodowlana przepływa przez wnętrze kapilar, a proces odżywiania komórek zachodzi dzięki dyfuzji substancji odżywczych oraz produktów przemiany materii przez pory membrany. W testowanym układzie zastosowano reaktor o całkowitej powierzchni membrany wynoszącej 0,75 m² oraz całkowitej pojemności 52 ml. Membrana pozwala na przepuszczanie substancji o masie cząsteczkowej do 30 kD, przy maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniu przepływu wynoszącym 600 mmHg. Reaktor łączy się z układem przepływowym przez złączki typu LureLock, stanowiące standard w medycznych układach przepływowych. W zależności od wielkości wykorzystywanego wkładu, złączki te mogą występować w dwóch rozmiarach. Zostały również opracowane specjalne połączenia przejściowe, umożliwiające zastosowanie różnych reaktorów przepływowych. Dodatkowo, zaprojektowane uchwyty w obudowie reaktora umożliwiają swobodne instalowanie wkładów hodowlanych o różnych rozmiarach, dostosowanych do specyficznych potrzeb hodowli.

Na podstawie przygotowanej tabeli inwentarzowej możliwe było przeprowadzenie środowiskowej oceny wpływu produkcji wkładów hodowlanych. Należy podkreślić, że wkłady do bioreaktora mogą mieć różną wielkość w zależności od potrzeb hodowli. W Tabeli 5 znajdują się masy poszczególnych elementów dla maksymalnego rozmiaru wkładu.

Tabela 5. Elementy do budowy wkładu z czujnikami Steemore wraz z ich masą.

Elementy wkładu do bioreaktora Steemore	Baza danych EcoInvent	Masa [g]
Polisulfon	Polisulfon	967,1
Czujniki:	Komponent elektroniczny	85
Wężyki silikonowe	Silikon	23
Złączki	Stal kwasowa	26
Złączki	Polietylen	13
Żywica	Żywica do druku 3D	160

Największy negatywny wpływ na środowisko mają komponenty elektroniczne (5,3 kg CO_{2eq}), polietylen (1,15 kg CO_{2eq}) oraz żywica (1,09 kg CO_{2eq}). Całkowita emisja CO₂ dla przyjętej jednostki funkcjonalnej to 8,33 kg CO_{2eq} (Rysunek 12).



Rysunek 12. Wielkość emisji CO_{2eq} dla poszczególnych elementów budowy wkładu bioreaktora do namnażania komórek macierzystych.

Kierowany przeze mnie zespół badawczy w **2019 roku wygrał 11 edycję konkursu „Młodzi w Łodzi – Mam pomysł na Startup”** (<https://youtu.be/bzbpdAaf1Ok>). Konkurs ten jest ukierunkowany na innowacyjne projekty, które łączą biznes różnych środowisk z potencjalnymi kontrahentami i inwestorami. Udział w projekcie był szansą na zdobycie środków finansowych (40 000 zł), ale także kontaktów z otoczeniem biznesowym.

Ponadto, reprezentowałam spółkę podczas wygranej przez Akrimtech programu grantowego **ACCELERATOR CLIMATE-KIC 2019**, uczestnicząc w szkoleniach, a także prezentując pomysł podczas VIII edycji Meet Up TOP500 Innovators, która odbyła się w dniach 8-10 maja 2019 roku we Wrocławiu.

10.3 Analiza śladu węglowego dla Politechniki Łódzkiej

Kolejnym zgłoszonym w ramach postępowania habilitacyjnego osiągnięciem jest autorstwo raportu dotyczącego obliczania śladu węglowego Politechniki Łódzkiej w zakresie 1 i 2. Ślad węglowy organizacji mierzony jest zazwyczaj w ujęciu rocznym, a wyrażany w ekwiwalencie dwutlenku węgla w przeliczeniu na kilogramy lub tony (kg/Mg CO₂eq).

Monitorowanie śladu węglowego stanie się wkrótce nie tylko obowiązkiem prawnym dla wielu przedsiębiorców, ale również warunkiem zachowania przewagi konkurencyjnej. Uczelniom pozwoli na wzmocnienie i rozwój wizerunku. Politechnika Łódzka przyłączyła się do wspieranej przez ONZ inicjatywy „Race to Zero”¹³. Ta globalna kampania zrzesza przedsiębiorstwa, miasta, a także instytucje z sektora edukacji, finansów i ochrony zdrowia, których wspólnym celem jest stworzenie i realizacja przejrzystych planów działań, służących ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych, zgodnie z założeniami porozumienia paryskiego (ang. Paris Agreement)¹⁴.

Kampania „Race to Zero for Universities and Colleges” jest realizowana we współpracy z EAUC (The Alliance for Sustainability Leadership in Education), Second Nature i Programem Środowiskowym ONZ (United Nations Environment Programme, UNEP). Sygnatariusze „Race to Zero” deklarują m.in. podjęcie działań zmierzających do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. Aby spełnić te oczekiwania należy najpierw poznać stan obecny poprzez wykonanie analizy śladu węglowego. Znając swój ślad węglowy, organizacje mogą efektywniej zarządzać poziomem emisji, zmniejszać emisyjność procesów, a co za tym idzie - redukować koszty.

Identyfikacja i weryfikacja emisji gazów cieplarnianych na terenie uczelni może posłużyć m.in. ocenie udziału źródeł emisji gazów cieplarnianych będących jej własnością, czy ocenie rozkładu emisji GHG, uwzględniając zmiany przestrzenne i czasowe. Obliczenia śladu węglowego różnią się między sobą zakresem analizy, np. mogą pomijać niektóre etapy cyklu życia, m.in. ze względu na brak wystarczających danych, rodzaj zastosowanej metodologii czy oprogramowania służącego do wyliczenia śladu węglowego.

¹³ "Race to Zero: Achieving Net Zero Emissions by 2050" Źródło: UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change).

¹⁴ UNFCCC. (2015). The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Sektor szkolnictwa wyższego również ma swój udział w emisji gazów cieplarnianych. Protokół Gazów Cieplarnianych (z ang. Greenhouse Gas Protocol, GHG Protocol), czyli standard, według którego organizacje obliczają swój ślad węglowy, dzieli emisje na trzy zakresy (wg normy ISO 14067):

Zakres 1 – bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych powstałe w wyniku spalania paliw w źródłach stacjonarnych i mobilnych lub powstałe w wyniku zachodzących procesów technologicznych czy ułatwiających się czynników chłodniczych.

Zakres 2 – emisje pośrednie, powstałe w wyniku zużywania importowanej (zakupionej lub dostarczonej z zewnątrz) energii elektrycznej, ciepłej, pary technologicznej.

Zakres 3 – wszystkie inne emisje pośrednie występujące w łańcuchu wartości organizacji, czyli emisje gazów cieplarnianych, na które organizacja może wpływać, ale których nie kontroluje. W zakresie 3 uwzględnia się emisje związane np. z transportem zakupionych towarów, wywozem odpadów, podróżami służbowymi, dojazdami pracowników/studentów do pracy pojazdami niebędącymi własnością organizacji. Często jest to największy zakres i jednocześnie najtrudniejszy do ilościowego oszacowania.

W celu obliczenia śladu węglowego PŁ wykorzystałam oprogramowanie SimaPro wraz z bazą Ecoinvent 3.10 oraz metodę IPCC 2021 GWP 100a. Wyniki w Tabelach 6 i 7 prezentują ślad węglowy w kg/m² powierzchni, określone na podstawie informacji dotyczących zużycia mediów na terenie kampusów oraz akademików należących do Politechniki Łódzkiej w latach 2019-2023.

Tabela 6. Wyniki śladu węglowego dla poszczególnych kampusów PŁ w latach 2019-2021.

Rok	2019	2020	2021
Typ	Ślad węglowy na m²		
Jednostka	[kg CO ₂ -eq/m ²]		
Kampus A	103,2	72,8	96,7
Kampus B	71,3	59,2	71,4
Osiedle Akademickie	98,2	73,2	79,9
Kampus C, D (z wyłączeniem Osiedla Akademickiego)	99,7	78,9	101,1

Znaczenie sektora budownictwa w procesie osiągnięcia neutralności klimatycznej jest niepodważalne. Zgodnie z najnowszymi danymi, budynki odpowiadają za około 38% globalnych emisji CO₂, z czego 28% stanowi emisja związana z eksploatacją budynków, natomiast pozostałe 10% wynika z zużycia energii potrzebnej do produkcji materiałów oraz technologii stosowanych w budownictwie, określanego mianem wbudowanego śladu węglowego.

Analiza powyższych danych pozwala na wskazanie wpływu pandemii na wyniki dotyczące śladu węglowego. W 2020 roku, w porównaniu do roku 2021, ślad węglowy budynków na terenie kampusu A zmniejszył się o 30,4 kg/m², co stanowi spadek o niemal 30%. Na Osiedlu Akademickim różnica wyniosła 25 kg/m² (25,5%), natomiast na kampusie B zredukowano ślad węglowy o 12,1 kg/m² (17%).

W latach 2022-2023 kontynuowałam badania, których wyniki prezentuję w Tabeli 7.

Tabela 7. Ślad węglowy Politechniki Łódzkiej w roku 2023 w przeliczeniu na m² powierzchni.

Ślad węglowy dla Politechniki Łódzkiej za rok 2022		
Jednostka	[kg CO ₂ /m ²]	[%]
Woda	0,14	0,13%
Prąd	44,60	42,42%
Ogrzewanie (gaz ziemny)	0,64	0,60%
Ogrzewanie (bez gazu ziemnego)	59,35	56,45%
Fotowoltaika	0,05	0,05%
Ogrzewanie z OZE	0,15	0,15%
Ścieki	0,21	0,20%
Razem	105,14	100,00%

Ślad węglowy dla Politechniki Łódzkiej za rok 2023		
Jednostka	[kg CO ₂ /m ²]	[%]
Woda	0,15	0,16%
Prąd	43,46	46,45%
Ogrzewanie (gaz ziemny)	0,44	0,47%
Ogrzewanie (bez gazu ziemnego)	48,99	52,36%
Fotowoltaika	0,05	0,05%
Ogrzewanie z OZE	0,25	0,27%
Ścieki	0,23	0,24%
Razem	93,57	100,00%

Wykonane przeze mnie obliczenia obejmowały wszystkie budynki Politechniki Łódzkiej, w tym osiedle akademickie oraz Liceum Politechniki Łódzkiej. Na podstawie przedstawionych danych można dostrzec wpływ zakończenia pandemii na ślad węglowy. W 2023 roku, w porównaniu z rokiem 2022, odnotowano wzrost globalnego zużycia wody na Politechnice Łódzkiej, szczególnie w Kampusie C, w którym znajdują się akademiki. Powrót studentów do tych obiektów oraz zwiększona liczba godzin zajęć stacjonarnych, wiązała się z większą liczbą studentów i pracowników przebywających na kampusie, co miało istotny wpływ na ten wzrost.

Jednocześnie wzrost aktywności uczelni w zakresie działań związanych z inicjatywą „Race to Zero” przyczynił się do zmniejszenia niektórych parametrów w skali całej uczelni, takich jak wartość bezwzględna emisji CO₂ (kg CO₂eq) oraz udział ogrzewania w łącznym śladzie węglowym w 2023 roku, w porównaniu do roku 2022. Zmiany te są wynikiem większej uwagi, jaką pracownicy, studenci oraz administratorzy budynków poświęcają kwestii efektywności energetycznej, w tym ekonomicznego ogrzewania.

Wyzwania związane ze zrównoważonym rozwojem w kontekście budynków wykraczają poza redukcję emisji CO₂ w trakcie ich eksploatacji. Niemniej jednak, na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że tzw. operacyjny ślad węglowy, czyli emisje CO₂ związane z ogrzewaniem, chłodzeniem, przygotowaniem ciepłej wody

użytkowej, użytkowaniem urządzeń, komputerów, wind, instalacji, serwerów, a także zużyciem wody i gazu, ma znaczący wpływ na całkowity ślad węglowy.

Kolejne działania będą koncentrować się na uwzględnieniu także Zakresu 3 w analizie śladu węglowego Politechniki Łódzkiej. Wyniki tych analiz będą stanowiły podstawę do podejmowania konkretnych działań praktycznych, mających na celu osiągnięcie zakładanej neutralności klimatycznej uczelni.

10.4 Ocena obciążeń środowiskowych technologii absorpcji CO₂ z gazów odlotowych za pomocą analizy cyklu życia w ramach projektu INVITES

W Polsce ponad 60% energii pochodzi ze spalania węgla wytwarzanego w Europie na potrzeby energetyki oraz przemysłu, zaś Polska i Niemcy emitują łącznie ok. 20% dwutlenku węgla¹⁵. W związku z tym, zanim alternatywne metody wytwarzania energii zostaną wystarczająco rozwinięte, kontynuowane są prace na udoskonaleniu technologii usuwania gazów spalinowych, które stanowią istotne obciążenie dla środowiska.

W latach 2016 - 2019 **uczestniczyłam w polsko-niemieckim projekcie o akronimie INVITES „Innovative Equipment for Intensified Recovery of CO₂ from Flue Gases”**. Projekt współfinansowany był przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach II konkursu polsko-niemieckiej współpracy na rzecz zrównoważonego rozwoju „STAIR”, prowadzonej wspólnie z Federalnym Ministerstwem Edukacji i Badań w Niemczech (BMBF) (Załącznik 5). **W projekcie tym objęłam nadzór and całością prac związanych z planowaniem badań, analizą i interpretacją wyników LCA dla absorpcji CO₂ z gazów odlotowych.**

W ramach projektu INVITES, przy zastosowaniu techniki analizy cyklu życia (LCA), przeprowadziłam ocenę środowiskową urządzenia RPB (ang. Rotated Packed Bed), wyrażoną za pomocą współczynników obrazujących jego wpływ na środowisko. Umożliwiło to obiektywną ocenę potencjału aplikacyjnego technologii RPB, zgodnego z zasadami zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym.

Zastosowanie urządzeń RPB w różnych sektorach przemysłowych, takich jak przemysł chemiczny, energetyczny czy spożywczy, przynosi liczne korzyści, m.in. dzięki możliwości wykorzystania technologii druku 3D do produkcji dedykowanych wirujących wypełnień dostosowanych do specyficznych procesów oraz łatwości ich adaptacji do zmieniających się warunków pracy¹⁶.

W ramach analizy przeprowadzonej w projekcie INVITES uwzględniłam dane dotyczące procesu absorpcji CO₂ z gazów odlotowych, takie jak zużycie ciepła, energii, substratów (amina, woda), transport materiałów, regenerację (odzysk) surowca oraz emisje [Rysunek 13]. Jako jednostkę funkcjonalną przyjął 1 tonę zaabsorbowanego dwutlenku węgla. Ponieważ analizowałam pojedynczy proces jednostkowy (eksploatacja urządzenia), zastosowałam typ analizy „od bramy do bramy”. Drugi etap zastosowanej techniki LCA

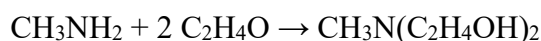
¹⁵ Klimat dla Polski Polska dla klimatu 1988 – 2018 – 2050, Instytut Ochrony Środowiska PAN, Zespół autorów pod redakcją R. Jeszke.

¹⁶ K. Gładyszewski, M. Skiborowski: Additive manufacturing of packings for rotating packed beds. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. Volume 127. pp. 1-9. dostęp: [03.09.2024]
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.02.024>.

opierał się na analizie bilansów materiałowo-energetycznych dla omawianego procesu. Zestawienie danych zostało zamieszczone w tabeli inwentarzowej [Tabela 8].

W analizowanym procesie separacji CO₂ z powietrza zastosowano wodny roztwór aminy wzbogacony o anhydrazę węglanową. Do układu wprowadzono strumień cieczy (zawierający wodę, aminę oraz enzym) oraz strumień gazu (składający się z CO₂ i powietrza). Zgodnie z przebiegiem procesu, strumień cieczy opuszczający absorber zawierał zaabsorbowany dwutlenek węgla, podczas gdy strumień gazowy, opuszczający absorber, był już pozbawiony CO₂. Temperatura rozpuszczalnika utrzymana była na stałym poziomie 20°C, co zapewniało optymalne warunki do utrzymania korzystnych właściwości roztworu absorbentu.¹⁷

Baza danych Ecoinvent, którą wykorzystałam do przygotowania tabel inwentarzowych, nie obejmowała wszystkich materiałów użytych w analizowanym procesie. W w bazie danych Ecoinvent programu SimaPro nie uwzględniono III-rzędowej aminy – MDEA (3,4-Metylenodioksy-N-etyloamfetamina) CH₃N(C₂H₄OH)₂. W związku z tym, w ramach realizowanego projektu, przeprowadziłam syntezę tego związku. Metylodietanoloamina jest organicznym związkiem chemicznym, który powstaje w wyniku etoksyłowania metyloaminy przy użyciu tlenku etylenu:



Syntezę przeprowadza się w fazie ciekłej w warunkach bezwodnych, w zakresie temperatury 60–90°C, pod ciśnieniem do 1 MPa. Proces charakteryzuje się autokatalitycznym mechanizmem reakcji. Technologia wyróżnia się niskim zużyciem energii oraz wysoką jakością uzyskiwanej metylo dietanoloaminy¹⁸. Założenia do przeprowadzenia analizy LCA uwzględniały 100 cykli użycia aminy, przy założeniu braku konieczności ponoszenia wydatków energetycznych na jej regenerację.

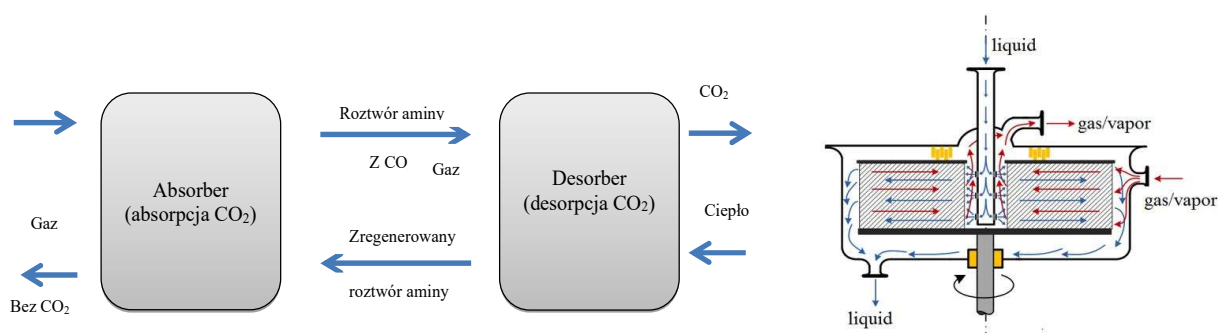
Tabela 8. Tabela inwentarzowa dla procesu absorpcji CO₂.

Lp.	Dane	Strumienie	Wartość
1.	Parametry procesowe	Zużycie energii RPB wentylator pompa	640 W/h 255 W/h 160 W/h
2.	Wejście	Strumień cieczy (69,7% woda, 30% MDEA, 0,3% enzym)	360 L/h
		Strumień gazu (CO ₂ +powietrze) CO ₂	127,4 kg/h (80 Nm ³ /h) 78,4 kg/h

¹⁷J. Wojtasik, K. Gładyszewski, i inni, Enzyme-enhanced CO₂ absorption process in rotating packed bed, 2018 , ss.1-9, [dostęp: 03.09.2024], DOI: 10.1007/s11696-018-0647-8

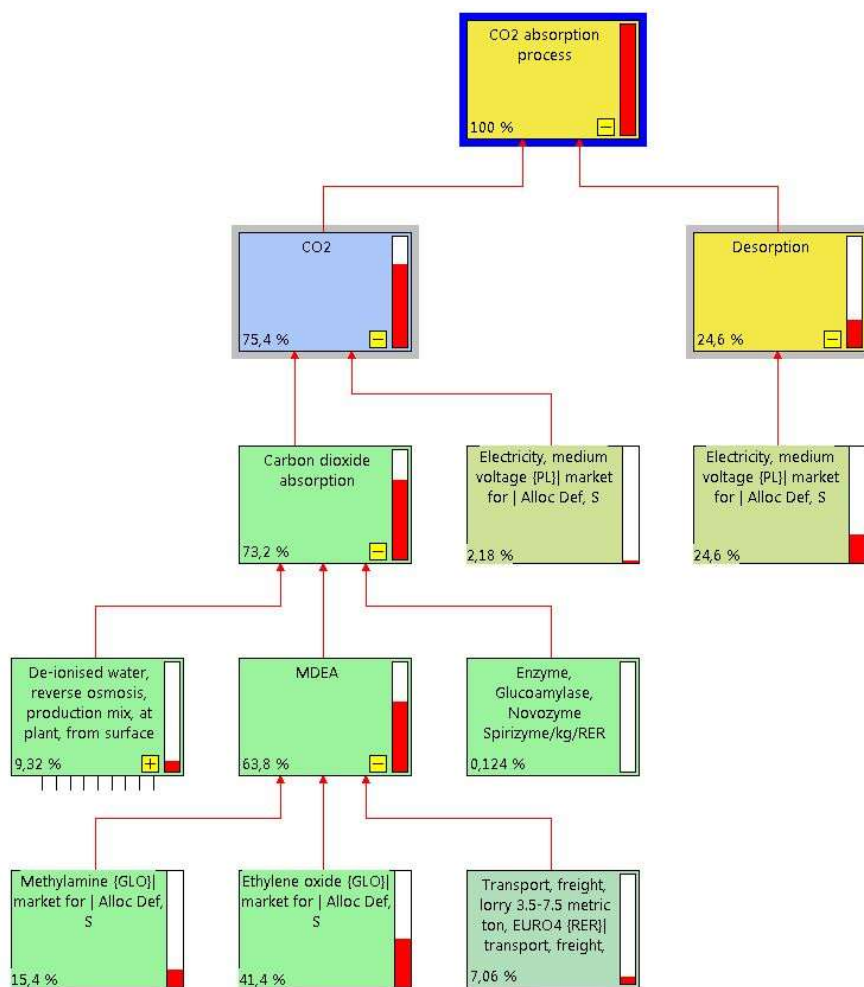
¹⁸ <https://www.openpr.com/news/1256941/methyl-diethanolamine-market-top-key-players-eastman-chemical-company-amines-plasticizers-ltd-and-basf-se.html>, . [dostęp 13.09.2024]

3.	Wyjście	Strumień gazu (CO_2 + powietrze)	113,1 kg/h (72,7 Nm^3/h)
		CO_2	64,1 kg/h
		Strumień cieczy (69,7% woda, 30% MDEA, 0,3% enzym)	374,3 L/h
4.	Proces desorpcji	Ciepło	3 GJ/1 t CO_2



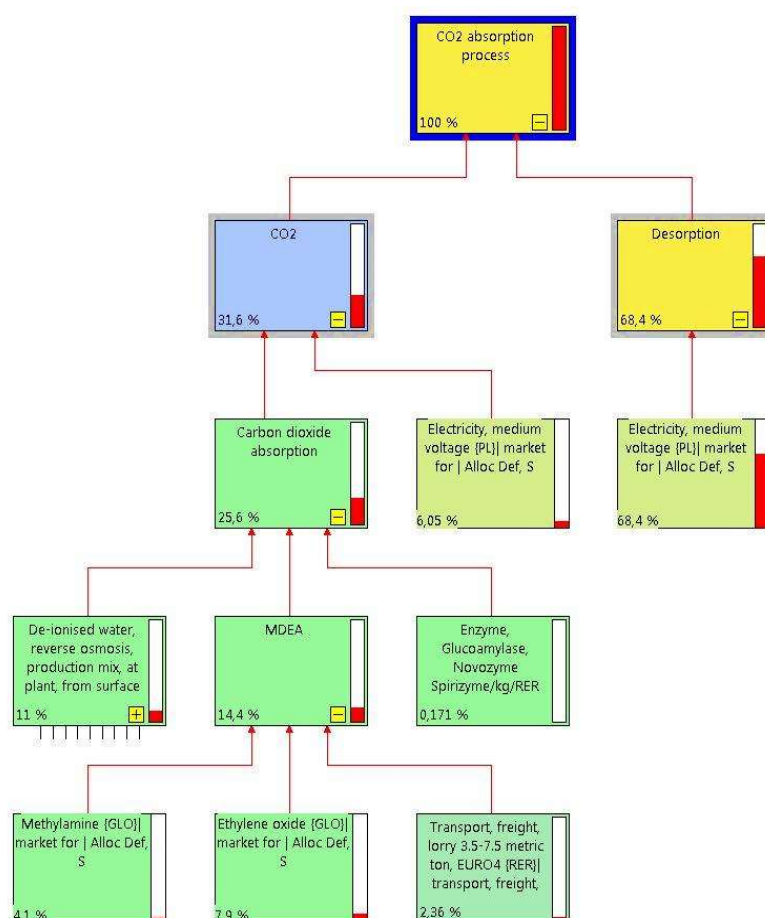
Rysunek 13. Uproszczony schemat procesu oraz schemat technologii absorpcji CO_2 z wykorzystaniem urządzenia RPB.

Przykładowe wyniki obliczeń LCA dla analizowanych kategorii szkód: zdrowie, jakość ekosystemu oraz zużycie zasobów przedstawiono na rysunkach 14, 15 i 16. Rysunki te ilustrują wykresy Sankeya dla wszystkich kategorii szkód w procesie usuwania CO_2 przy zastosowaniu absorbera gazów z wirującym wypełnieniem, z podziałem na etapy absorpcji CO_2 ze strumienia gazowego oraz desorpcji. Wyniki potwierdzają, że desorpcja CO_2 stanowi blisko 80% całkowitego zapotrzebowania na energię w procesie. Zapotrzebowanie cieplne w procesie regeneracji sorbentu CO_2 jest zależne od rodzaju zastosowanej aminy oraz parametrów pracy instalacji. W analizowanym przypadku, przy zastosowaniu N-metylodietanoloaminy, dzięki niższemu zapotrzebowaniu na energię do regeneracji, zużycie energii jest zredukowane, jednak nadal ten etap procesu pozostaje najbardziej energochłonny. Proces regeneracji wymaga dostarczenia ciepła do układu. Pobór energii w procesach chemicznej absorpcji dwutlenku węgla, w zależności od zastosowanej metody, mieści się w zakresie od 0,3 do 0,8 kWh/kg CO_2 (przy niskim ciśnieniu 0,34 kWh/kg CO_2 oraz przy absorpcji przy wysokim ciśnieniu 0,11 kWh/kg CO_2).



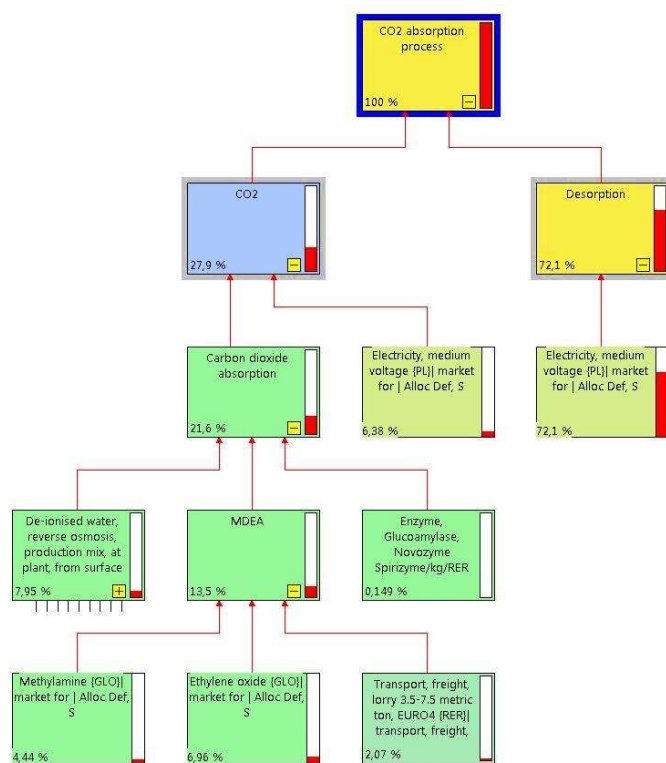
Rysunek 14. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO₂ z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze zasoby.

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że największy negatywny wpływ na środowisko, w kategorii zasobów, wiąże się z zużyciem surowców wykorzystywanych w syntezie metyldietanolaminy (MDEA), który wynosi 68,3%. Mniejszy, wynoszący ponad 24%, udział w tej kategorii szkód ma energia wykorzystywana w procesie regeneracji roztworu aminy [Rysunek 14]. Udział MDEA w całym procesie zależy od liczby cykli jego użycia, przy założeniu braku konieczności regeneracji.



Rysunek 15. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO₂ z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze ekosystemu.

W kategorii szkód związanych z ekosystemem [Rysunek 15], największy udział ma energia zużywana na potrzeby regeneracji roztworu aminy, wynoszący 68,4%. W Polsce, gdzie ponad 60% energii pochodzi ze spalania węgla, energia zużywana w procesie regeneracji przyczynia się do powstawania znaczących szkód nie tylko dla środowiska, ale także dla zdrowia ludzi. Zapotrzebowanie cieplne w procesie regeneracji sorbentu CO₂ jest uzależnione od rodzaju zastosowanej aminy oraz parametrów pracy instalacji. W analizowanym przypadku, przy zastosowaniu metyldietanoloaminy, dzięki niższemu zapotrzebowaniu na energię do regeneracji, zużycie energii jest zredukowane, jednakże ten etap procesu pozostaje nadal najbardziej energochłonny. Produkcja energii elektrycznej, związana z emisją CO₂ podczas spalania węgla, skutkuje największymi szkodami zdrowotnymi, co zostało przedstawione na Rysunku 16.



Rysunek 16. Drzewo procesowe ilustrujące wpływ procesu absorpcji CO₂ z zastosowaniem urządzenia RPB na kategorię szkód w obszarze – zdrowie ludzkie.

Podstawowym celem przeprowadzonych przeze mnie analiz LCA w ramach projektu INVITES było określenie obciążeń środowiskowych nowej technologii usuwania CO₂ z gazów odlotowych przy zastosowaniu urządzenia RPB. **W ramach mojej pracy, po raz pierwszy w literaturze, przeprowadziłam badania LCA tej technologii w kontekście jej potencjalnego wdrożenia na skalę przemysłową.** Realizacja analiz środowiskowych w tym projekcie wniosła istotne innowacje. Dzięki zastosowaniu siły odśrodkowej, urządzenia RPB mogą działać przy niższym zużyciu energii w porównaniu do tradycyjnych metod, co prowadzi do mniejszych emisji gazów cieplarnianych. Dodatkowo, urządzenia RPB zajmują mniej miejsca niż konwencjonalne kolumny absorpcyjne, co ułatwia ich integrację w istniejących instalacjach przemysłowych oraz redukuje wpływ na środowisko.

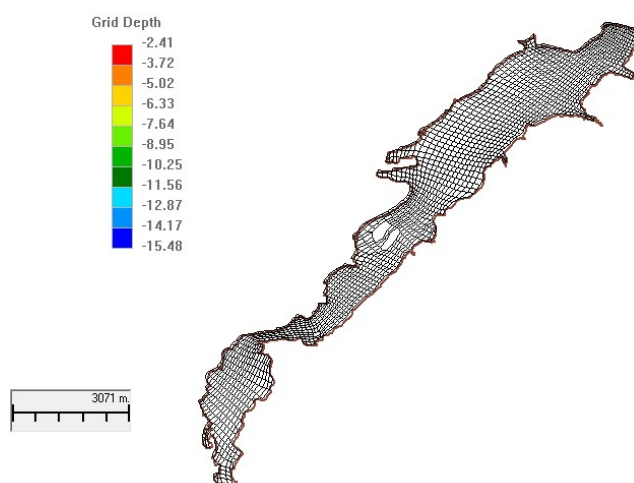
Analiza opracowanych przeze mnie profili środowiskowych dla urządzenia RPB z wirującym wypełnieniem wykazała, że największy negatywny wpływ na środowisko związany jest z energią wykorzystywaną w procesie desorpcji. Wynika to z faktu, iż desorpcja gazu odbywa się przez podgrzewanie rozpuszczalnika. Wychwytywanie CO₂ wiąże się ze wzrostem zużycia energii elektrycznej niezbędnej do regeneracji absorbentu, która odbywa się w temperaturze 50°C, aż do momentu osiągnięcia akceptowalnej wartości pH cieczy. Warto także zaznaczyć, że ta sama amina może być wykorzystywana nawet 100 razy w analizowanym procesie, bez konieczności zużycia dodatkowej energii na regenerację. Korzyścią wynikającą ze stosowania absorberów gazów z wirującym wypełnieniem jest również zmniejszenie zużycia substancji absorbujących, co pozwala na osiągnięcie wyższej sprawności procesu.

Wprowadzenie urządzeń RPB do procesów przemysłowych może wspierać cele zrównoważonego rozwoju, poprzez zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych oraz minimalizację odpadów. Wyniki tych badań prezentowałam na 23. Konferencji Inżynierii Chemicznej i Procesowej, a także zostały opublikowane w materiale konferencyjnym:

A. Ziemińska-Stolarska, I. Zbiciński, K. Gładyszewski, A. Górak: CO₂ recovery from flue gases - LCA analysis. Konferencja 23rd Polish Conference of Chemical and Process Engineering, Book of Abstract, 2019.

11. Informacja o wykazaniu się istotną aktywnością naukową w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej.

Współczesne badania naukowe prowadzone są głównie w dużych, często międzynarodowych zespołach badawczych. Przykładem takich działań są moje badania, które obejmują zarówno analizę cyklu życia, będącą głównym osiągnięciem naukowym, jak i tematykę modelowania oraz monitoringu jakości wód powierzchniowych. W ramach prowadzonej działalności naukowej podjęłam współpracę z Norweskim Instytutem Jakości Wody w Oslo (NIVA). W wyniku tej współpracy **odbyłam trzymiesięczny staż (29.06.2015–20.09.2015) w Oslo (Załącznik 8)**, pod opieką prof. Johna Rune Selvika oraz dr. Torulva Tjomslanda, podczas którego przesłam szkolenie z zakresu modelowania jakości wód powierzchniowych przy wykorzystaniu oprogramowania GEMSS (Generalized Environmental Modeling System for Surface Waters, ERM® Inc. Exton, PA, USA). GEMSS® jest trójwymiarowym, wielofunkcyjnym modelem matematycznym zaprojektowanym do modelowania środowiska wód powierzchniowych. Doświadczenie zdobyte w trakcie stażu umożliwiło mi wykonanie symulacji jakości wód w projekcie MONSUL. Pierwszym etapem tego procesu było opracowanie trójwymiarowej geometrii 17-kilometrowego Zalewu Sulejowskiego (Rysunek 18), do czego wykorzystano moduł hydrodynamiczny modelu GEMSS – HDM. Do analizy jakości wody zastosowałam model WASP (Water Analysis Simulation Programme).

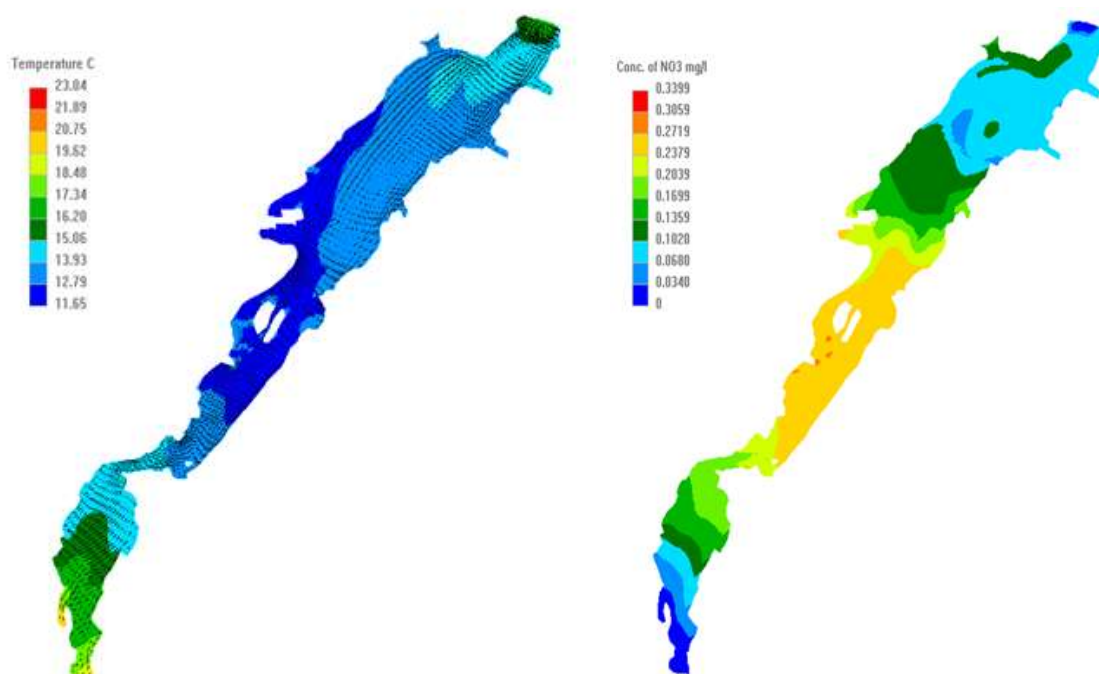


Rysunek 17. Trójwymiarowa siatka obliczeniowa wygenerowana w programie GEMSS.

W celu przeprowadzenia symulacji stanu ekologicznego wód Zalewu Sulejowskiego, zgromadziłam następujące dane wejściowe: a) dane meteorologiczne (temperatura wody, prędkość i kierunek wiatru, temperatura punktu rosy), b) dane hydrauliczne (współczynnik Manninga), c) dane dotyczące warunków początkowych i brzegowych, d) szeregi czasowe napływu parametrów jakościowych, e) współczynniki reaeracji. Wszystkie dane zostały wprowadzone w formie wartości dziennych.

Dodatkowo przyjąłam założenie, że zbiornik jest obciążony punktowymi źródłami zanieczyszczeń, głównie pochodzącymi z komunalnych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w pobliżu Zalewu Sulejowskiego. Zmienność napływających substancji odżywczych była wyrażona w jednostkach kg/dzień i obejmowała średnie wartości obciążeń ładunkiem biogennym w poszczególnych miesiącach.

Rysunek 18 przedstawia wyniki symulacji przeprowadzonych na danych z roku 2015. Na rysunku 18a) zaprezentowany jest rozkład temperatur wody w maju, waha się on w zakresie od 19°C w pobliżu wlotu do zbiornika (wpływ cieplejszej wody wchodzącej do zalewu wraz z dopływami) do 14°C w głębszej części jeziora. Rysunek 18b) przedstawia rozkład stężeń związków azotowych. Wyższe wartości stężeń (0,27 mg N/dm³) występują w strefie przejściowej (między częścią rzeczną a jeziorną) w maju. Jest to związane z lokalizacją osiedli ludzkich w tej części jeziora. Ponadto, stężenia azotu są kilkakrotnie niższe w okresie wegetacyjnym niż wczesną wiosną i późną jesienią, co może być efektem mniejszego dopływu rozpuszczonych substancji ze zlewni, intensywniejszego pobierania azotu przez rozwijający się fitoplankton oraz nasilenia procesu denitryfikacji. Azot występujący w zbiorniku jest głównie czynnikiem pochodzenia allochtonicznego (wnoszony z wodami rzek, zwłaszcza w okresie zwiększonego napływu).



Rysunek 18. Rozkład a) temperatur i b) azotanów (NO_3^-) wzdłuż zbiornika, w maju 2015r.

Rezultatem współpracy z Norweskim Instytutem Jakości Wody w Oslo jest publikacja naukowa [B.5], w której prezentuję modelowanie hydrodynamiki przepływu wód w Zbiorniku Sulejowskim. Przeprowadzone przeze mnie obliczenia wykazały zgodność

z pomiarami uzyskanymi w ramach badawczego programu monitoringu jakości wód w projekcie MONSUL. Wyniki te mogą stanowić istotne narzędzie wspierające podejmowanie decyzji w zakresie prognozowania jakości wody, szczególnie w kontekście procesu eutrofizacji. Dodatkowo, uzyskane dane mogą ułatwić podejmowanie decyzji dotyczących zmian w zarządzaniu gospodarką wodną zbiornika w odpowiedzi na zmieniającą się presję antropogeniczną, co w przypadku Zbiornika Sulejowskiego ma zasadnicze znaczenie.

Po zakończeniu projektu MONSUL współpraca pomiędzy Norweskim Instytutem Jakości Wody, a Politechniką Łódzką była kontynuowana, czego dowodem **była współorganizowana przeze mnie wizyta studyjna, która odbyła się w dniach 14.06-17.06.2016 r. w Norwegii (Moss)**. W spotkaniu uczestniczyła delegacja składająca się z piętnastu samorządowców z województwa łódzkiego, w tym przedstawiciele Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska (WIOŚ), Regionalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska (RDOŚ), Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej (RZGW), Urzędu Marszałkowskiego, Politechniki Łódzkiej oraz Uniwersytetu Łódzkiego. Głównym celem spotkania było zaprezentowanie uczestnikom sposobów radzenia sobie Norwegii z problemem jakości wód powierzchniowych, w szczególności eutrofizacją oraz omówienie kluczowych zagrożeń w tym obszarze i metod poprawy stanu wód powierzchniowych. Wizyta studyjna miała miejsce na obszarze zlewni jeziora Vansjø. Wymiana doświadczeń i nawiązywanie współpracy podczas tego rodzaju spotkań pozwala uświadomić wszystkim zaangażowanym w działania na rzecz poprawy jakości wód, jak istotne jest racjonalne gospodarowanie wodami. Przykład Norwegii, która swoją silną pozycję gospodarczą zawdzięcza w dużej mierze efektywnemu wykorzystaniu zasobów naturalnych, stanowi doskonały model do naśladowania. Spotkanie przyczyniło się do zwiększenia świadomości ekologicznej wśród samorządowców oraz przedstawicieli instytucji odpowiedzialnych za ochronę środowiska w Polsce.

Kolejną istotną współpracą w mojej karierze naukowej była ta z Politechniką w Dortmundzie. Moja współpraca z zespołem kierowanym przez prof. Katrin Rosenthal dotyczyła zastosowania oceny cyklu życia (LCA) do oceny środowiskowej bioprocesu, mającego na celu produkcję cyklicznych dinukleotydów. Prof. Katrin Rosenthal jest ekspertem w dziedzinie badań laboratoryjnych nad cyklicznymi dinukleotydami oraz ich szlakami syntez. Współpraca w międzynarodowym zespole umożliwiła wspólne opublikowanie artykułu naukowego [A.6]. M. Becker, **A. Ziemińska-Stolarska**, D. Markowska, S. Lütz, K. Rosenthal, Comparative Life Cycle Assessment of Chemical and Biocatalytic 2'3'-Cyclic GMP-AMP Synthesis, ChemSusChem, 2023, 16, e202201629.

Niezwykle istotnym elementem mojej kariery naukowej jest współpraca z Uniwersytetem Warszawskim oraz z prof. dr. hab. Arturem Magnuszewskim. Zagadnienia związane z analizą jakości wód w kontekście hydrodynamiki przepływu są kontynuowane w ramach tej współpracy. Efektem wspólnych działań jest publikacja dwóch artykułów naukowych, których jestem współautorem.

[B.7] K. Peshang, **A. Ziemińska-Stolarska**, A. Magnuszewski, Hydraulic Control On Sedimentation Processes And Bottom Sediments Chemistry of Sulejów Reservoir in Poland, *Miscellanea Geographica*, 2024, vol. 28, nr 1, pp. 39-46.

[B.8] K. Peshang, M. Kalinowska, **A. Ziemińska-Stolarska**, A. Magnuszewski, Phytoplankton Bloom Localized by Sentinel-2 Images and Hydrodynamic Modelling - Sulejów Reservoir, Pilica River, Poland, Preprints, 2024. DOI: 10.20944/preprints202404.0439.v1.

12. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

12.1 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych

Do marca 2025 roku byłam promotorem następującej liczby prac dyplomowych:

1. Inżynierskie – 17
2. Magisterskie – 25

Moja dyplomantka mgr inż. Barbara Grabjasz **otrzymała nagrodę im. Profesora Mieczysława Serwińskiego za najlepszą pracę dyplomową na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej w roku 2014/2015**. Tytuł pracy magisterskiej „Modelowanie CFD przepływu wody w kanale otwartym na przykładzie rzeki Jasień (województwo łódzkie).”

Dodatkowo byłam promotorem pomocniczym dwóch prac magisterskich realizowanych w ramach praktyk ERASMUS + na Politechnice Łódzkiej:

1. **Gustavo Rangel** (Uniwersytet w Porto) Tytuł pracy magisterskiej: “LCA of a novel f-t syncrude pathway using advanced netmix microreactor technology. Conversion of associated gas destined for flaring into liquid fuels in offshore FPSO operations” (2019/2020), praca obroniona z wyróżnieniem.
2. **Ana Rita M. Martinho** (Uniwersytet w Porto) Tytuł pracy magisterskiej: ”Life cycle assessment of a novel CO₂ capture technology (HGTS) on retrofitting coal and natural gas power plants: Portugal case study”(2019/2020), praca obroniona w wyróżnieniu.

W 2023 i 2024 roku byłam opiekunem dwóch studentów z Francji (Uczelnia Ecam Rennes) w ramach 12 tygodniowych praktyk studenckich ERASMUS +. **Quentin Moal** (tematyka stażu: “LCA calculations for different composite materials and technologies used in shipbuilding industry”, **Alexis Querinel** (tematyka stażu “Electrical Distribution System LCA for Future Regional Aircraft - Preliminary Definition of Methodology”).

Obecnie jestem promotorem pomocniczym w **przewodzie doktorskim mgr inż. Peshang Hama Karim** prowadzonym na Uniwersytecie Warszawskim na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych pt. ”Assessment of nutrient transports and density current process on an existing artificial reservoir: The case study of Sulejów Reservoir on the Pilica River,

Poland”. Promotorem głównym rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. Artur Magnuszewski.

W 2021 roku w ramach Projektu ZPU PŁ (Zintegrowany Program Politechniki Łódzkiej na rzecz rozwoju regionu łódzkiego realizowany w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój, Oś priorytetowa III. Szkolnictwo wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działanie: 3.5 Kompleksowe programy szkół wyższych) **opracowałam efekty kształcenia, treści merytoryczne oraz metody weryfikacji przedmiotu „Podstawy Analizy Cyklu Życia”** prowadzonego na Politechnice Łódzkiej. Uczestniczyłam w przeszkoleniu 25 osób, przygotowujących wdrożenie przedmiotu na poszczególnych wydziałach Politechniki Łódzkiej.

Od czasu podjęcia zatrudnienia w Politechnice Łódzkiej (10.2014 r.) prowadziłam zajęcia dydaktyczne w ramach **14 przedmiotów (7 z nich jestem kierownikiem)** o różnorodnej tematyce. We wszystkich dotychczasowych ankietach dydaktycznych zostałam pozytywnie oceniona przez studentów. **W 2024 roku zostałam nominowana w Plebiscycie "Najlepszy Nauczyciel Roku Akademickiego 2023/2024"** organizowanym przez Samorząd Studencki Politechniki Łódzkiej.

Listę przedmiotów wraz ze wskazaniem formy prowadzonych zajęć (wykład, laboratorium, seminarium lub projekt) przedstawiłam poniżej:

Zajęcia prowadzone na I stopniu studiów:

Ekologia i Ochrona Środowiska

- **wykład, ćwiczenia** – kierunek Inżynieria Bezpieczeństwa Pracy, studia stacjonarne i niestacjonarne

Uzdatnianie wody i oczyszczanie ścieków

- **wykład**, kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Technologie oczyszczania ścieków

- **laboratorium** – kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne

Technologie uzdatniania wody

- **laboratorium** – kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Biologia z ekologia

- **seminarium, wykład** - kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne

Meteorologia, hydrologia, geologia

- **wykład**, kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Gospodarka wodna i ochrona wód

- **wykład, ćwiczenia** – kierunek Inżynieria Ochrony Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Podstawy prawa ochrony środowiska

- **wykład** – kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Podstawy Analizy Cyklu Życia

- **projekt** – kierunek Inżynieria Bezpieczeństwa Pracy, Inżynieria Ochrony Środowiska, Inżynieria w Ochronie Środowiska, Elektronika i Telekomunikacja, Chemia, studia stacjonarne i niestacjonarne

Zajęcia prowadzone na II stopniu studiów:Zrównoważony rozwój w przemyśle

- **seminarium** – kierunek Inżynieria Procesów Przemysłowych, studia stacjonarne
- **wykład** – kierunek Inżynieria Środowiska, studia stacjonarne i niestacjonarne

Zajęcia prowadzone w języku angielskim:Technology Transfer Project

- **projekt** – Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, studia stacjonarne

Life Cycle Assessment

- **projekt** – kierunki: Inżynieria Ochrony Środowiska, Modelling and Data Science, studia stacjonarne

Professional Design Project

- **projekt** – kierunek Modelling and Data Science, studia stacjonarne.

12.2 Informacja o osiągnięciach organizacyjnych

1. Udział w pracach w ramach komitetu organizacyjnego, naukowego i/lub programowego następujących konferencji naukowych:

- XXII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Spała, 5-9 września 2016 rok
- Baltic University Programme, 7th PhD Students Training, Interdisciplinary–Multicultural–International, Rogów, 24-28 listopada 2019
- Baltic University Programme Symposium 2020, online, 24-28 sierpnia 2020
- Baltic University Programme, 8th PhD Students Training, Interdisciplinary–Multicultural–International, Łódź, 24-28 listopada 2021
- Baltic University Programme, 9th PhD Students Training, Interdisciplinary–Multicultural–International, Łódź, 23-27 listopada 2022
- 8th European Drying Conference, Łódź, 4-7 lipca 2023 rok

2. Od 2015 roku pełnię funkcję **pełnomocnika Dziekana ds. Rekrutacji i Promocji na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej**.

3. Od 2019 roku jestem **członkiem uczelnianej Rady Dyscypliny kierunku Inżynieria Ochrony Środowiska**, a od 2020 roku także **Rady Dyscypliny kierunku Energy System in Build Environment na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ**.

4. **Od 2019 roku jestem członkiem komisji egzaminacyjnej kierunku Inżynieria Środowiska (obecnie Inżynieria Ochrony Środowiska) na studiach I stopnia realizowanych na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ**.

5. **W styczniu 2025 roku objęłam funkcję dyrektora Polskiego Centrum Uniwersytetu Bałtyckiego na 4-letnią kadencję 2025-2028**. Jednocześnie zasiadam w międzynarodowym Komitecie BUP (**International Board**) (<https://www.uu.se/en/collaboration-innovation/the-baltic-university-programme/contact/national-centres/polish-national-centre>)

Baltic University Programme (BUP) to międzynarodowa sieć akademicka, której celem jest wspieranie zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska i demokracji w regionie Morza Bałtyckiego. Główne cele i zadania BUP:

- Edukacja i badania: BUP wspiera uczelnie wyższe w szerzeniu wiedzy na temat zrównoważonego rozwoju ekonomicznego, ekologicznego i społecznego.
- Współpraca międzynarodowa: Program promuje współpracę między uczelniami wyższymi w regionie Morza Bałtyckiego poprzez organizację szkoleń, warsztatów, seminariów i konferencji zarówno dla studentów, doktorantów jak i nauczycieli akademickich.
- Innowacyjne kursy i projekty: BUP tworzy i rozwija innowacyjne kursy uniwersyteckie oraz projekty realizowane we współpracy z partnerami naukowymi jak i biznesowymi.

Przed objęciem stanowiska Dyrektora Polskiego Centrum BUP, aktywnie uczestniczyłam w działaniach sieci, biorąc udział w międzynarodowych sympozjach oraz kursach dla doktorantów i nauczycieli akademickich. W latach 2019, 2022 i 2024 pełniłam rolę eksperta oceniającego prace doktorskie zgłoszone na międzynarodowy kurs dla doktorantów z uniwersytetów zrzeszonych w sieci. 19 marca 2025 roku Współorganizowałam III Krajową Konferencję BUP, podczas której przedstawiłam plany działania Uniwersytetu na rok 2025 oraz zaproponowałam wspólne inicjatywy we współpracy z polskimi uniwersytetami uczestniczącymi w programie BUP.

12.3. Informacja o osiągnięciach popularyzujących naukę i upowszechniających wyniki badań naukowych

1. Pracując jako adiunkt naukowo-dydaktyczny na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej aktywnie angażuję się w popularyzację nauki. **Organizuję spotkania z młodzieżą**, prowadząc wykłady zarówno na uczelni (m.in. Festiwal Nauki, Techniki i Sztuki, Drzwi zawsze otwarte, Dzień wody, Dzień liczby π), jak i w szkołach ponadpodstawowych.
2. **Jestem autorką monografii popularnonaukowej** pt.: "Łódzkie kłopoty z wodą – cała nadzieja w pikselach" (ISBN 978-83-61997-58-0), w której opisuję historię powstania Zalewu Sulejowskiego, problemów jakościowych jego wód i sposobów na ciągły monitoring i kontrolę, które mogą przyczynić się do poprawy jego potencjału ekologicznego.
3. Uczestniczę w wielu inicjatywach promujących naukę, m.in. **jestem autorką sześciu artykułów popularno-naukowych na blogu Politechniki Łódzkiej** (<https://blog.p.lodz.pl/autorzy/dr-aleksandra-zieminska-stolarska>).
 - Susza niejedno ma imię
 - Ślad węglowy Politechniki Łódzkiej
 - Nauka płynie z rzeki
 - Gospodarka cyrkularna a analiza cyklu życia
 - Dlaczego płoną śmieci?
 - Bioreaktor do hodowli komórek macierzystych

4. W ramach cyklu spotkań z młodzieżą z **Łódzkiego Uniwersytetu Dziecięcego** 20.10.2018 roku zaprezentowałam wykład pt. „Czy woda zawsze będzie leciała z kranu?”.
5. W 2018 i 2021 roku uczestniczyłam w dwóch edycjach nagrodzonego nagrodą Genius Universitatis cyklu „**Wiedzą co mówią**” (<https://p.lodz.pl/nauka/popularyzacja-nauki/wiedza-co-mowia>), gdzie przygotowałam popularno-naukowe filmy i podcasty o różnorodnej tematyce: „Co wisi w powietrzu?”, „Skąd pochodzi woda w naszych kranach?”, „3D druk – przyjaciel czy wróg?”, „Jaki potencjał mają komórki macierzyste?”, „Czy w dobie pandemii koronawirusa Ziemia odetchnie z ulgą?”
6. W ramach moich dodatkowych działań popularyzatorskich byłam koordynatorem prac związanych z obliczeniem śladu węglowego dla wydarzenia masowego jakim był **Międzynarodowy Festiwal Producentów Muzycznych Soundedit**, który odbył się w listopadzie 2022 roku w Łodzi. Było to pierwsze w Polsce tak kompleksowe badanie oparte o ankiety wśród uczestników wydarzenia dotyczące m.in. kwestii transportu, jakim docieramy na wydarzenie (komunikacja zbiorowa, samochód, samolot, pieszo) oraz ich codziennych przyzwyczajzeń i sposobu życia (korzystanie z fotowoltaiki, kupowanie w second handach, spożywanie mięsa), ale także o bezpośrednie pomiary zużycia energii podczas samego festiwalu. W ramach wspomnianych działań powstał Raport PlayFair2022, którego jestem współautorką. Raport ten szczegółowo opisuje kwestie takie jak: jak zorganizować nisko- i zeroemisyjne wydarzenie masowe? Jak skutecznie ograniczyć ślad węglowy generowany podczas eventów? Jaką strategię działania obrać, aby wprowadzane zmiany przynosiły realne efekty? Jak będzie wyglądać zrównoważona przyszłość branży eventowej, muzycznej, modowej, nieruchomości i spożywczej? Ile CO₂ wyemitowano podczas koncertów Soundedit i jakie wnioski należy wyciągnąć na podstawie tych danych.
7. W listopadzie 2023 roku wystąpiłam w odcinku cyklu filmowego „**Ekologicznie z PŁ**”, gdzie prezentowałam wyniki analiz śladu węglowego dla Politechniki Łódzkiej, których jestem autorką (<https://www.youtube.com/watch?v=i8t3mBW6vzE>).
8. Publikowałam informacje na temat moich osiągnięć naukowych na łamach **Dziennika Gazeta Prawna** (27.12.2023, nr 249 (6163) „Samolot hybrydowy-przyszłość lotnictwa oraz **Rzeczpospolita** (8.11.2014, nr 4261 (13002) – „Lotnictwo przeszłości”.
9. W listopadzie 2023 roku uczestniczyłam w projekcie Fundacji Politechniki Łódzkiej „**Ekolog[JA] – rozwijanie postaw proekologicznych**”, który otrzymał dofinansowanie Ministerstwa Edukacji i Nauki (<https://fundacja.p.lodz.pl/projekt-ekolog-ja/#oprojekcie>). Projekt miał na celu zachęcić studentów do podejmowania działań proekologicznych, zwiększyć świadomość ekologiczną wśród młodzieży, oraz ukierunkować studentów na działania wpływające na „zielone zmiany” w gospodarce. W ramach tego projektu **prowadziłam warsztaty** dla studentów Politechniki Łódzkiej pt. Mój „Ecofootprint” – Warsztat dla liderów zmian. Tematyka warsztatów dotyczyła śladu węglowego i jego obliczeń dla materiałów, produktów, a także organizacji. W ramach tego projektu **moderowałam też dwa panele eksperckie** w tematyce:

- Ekologiczna rewolucja w modzie i biznesie, droga ku Gospodarce Obiegu Zamkniętego (<https://youtu.be/OxkVkDyinlw>)
- Ślad węglowy, eko innowacje, przyszłość gospodarki (<https://youtu.be/udUPOXE6grc>)

10. 1.06.2024 roku wystąpiłam w reportażu „**Łódzka Nauka**”, który ukazał się w łódzkiej telewizji TVP3, gdzie prezentowałam założenia koordynowanego przeze mnie na Politechnice Łódzkiej projektu HECATE (Łódzka Nauka: 01.06.2024 (tvp.pl)).

12.3.1. Wystąpienia na konferencjach naukowych

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora trzykrotnie przedstawiałam wyniki swoich badań jako **keynote speaker** na konferencjach ogólnopolskich i międzynarodowej:

1. **XXIV Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, 13-16.06.2023, Szczecin, Polska**, wykład plenarny zatytułowany: „The role of life cycle assessment in the implementation of circular economy in sustainable future” Aleksandra Ziemińska-Stolarska, Stanisław Ledakowicz
2. **ICCAEE 2023 International Conference on Civil, Architectural and Environmental Engineering. 17-19.11.2023, Shanghai, China (on-line)**, wykład plenarny zatytułowany: „Life cycle Assessment As The Best Indicator Of Circular Economy In Environmental Engineering” Stanisław Ledakowicz, Aleksandra Ziemińska-Stolarska
3. **XXII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, 5-9.09.2016 r. Spała, Polska**, wykład plenarny zatytułowany: “On-line” Method of measuring the quality parameters of water in the Sulejów reservoir. Aleksandra Ziemińska-Stolarska, Ireneusz Zbiciński

Ponadto 18 razy prezentowałam wyniki swoich badań na konferencjach naukowych zarówno w języku angielskim:

1. **27.09-2.10.2015**, 10th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, SDEWES Water and Environment Systems, Dubrovnik, Chorwacja, tytuł wystąpienia: „Analysis of factors affecting the ecological status of the Sulejow Reservoir based on continuous monitoring and an integrated 3D model of the artificial lake”.
2. **25-26.02.2016**, 18th International Conference on Environmental and Urban Systems Engineering, Londyn, Wielka Brytania, tytuł wystąpienia: 3D model of Hydrodynamics in Lowland Dam Reservoir in Poland. Aleksandra Ziemińska-Stolarska, Ireneusz Zbiciński.
3. **2-5.06.2019**, 23rd Polish Conference of Chemical and Process Engineering, Jachranka, Polska, tytuł wystąpienia: „CO2 recovery from flue gases-LCA analysis”,
4. **24-28.08 2020**, BUP Symposium 2020, online, Research and Innovation for a Sustainable Baltic Sea Region, tytuł wystąpienia: „Continuous automatic monitoring as a method of assessing water quality on the example of large water reservoir in Central Poland”

5. **6-7.10.2021**, II International Scientific Conference - Ecosystems without borders, Kaliningrad, Rosja, tytuł wystąpienia: "LCA analysis of CO2 emissions from flue gases"
6. **23-26.10.2022**, 1st International conference on energy, environment & digital transition, Mediolan, Włochy, tytuł wystąpienia: „Comparative LCA analysis for replacement of materials to reduce environmental impact”
7. **6-10.11.2022**, 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) Paphos, Cypr, tytuł wystąpienia: „Environmental impact of HCPV module combining space-grade solar cells and optical micro-tracking”
8. **22-25.10.2023**, 2nd International Conference on Energy, Environment & Digital Transition, Palermo, Włochy, tytuł wystąpienia: „Environmental impact of fibre-reinforced polymers application in shipbuilding industry”
9. **7-8.11.2023**, Baltic University Programme Symposium (on-line), tytuł wystąpienia: „Life cycle assessment studies in circular economy”

Jak i w języku polskim:

1. **18.11.2015**, GISDay2015, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, tytuł wystąpienia: „Zastosowania narzędzi modelowania GEMSS w projekcie Monsul”
2. **22.05.2018**, Łódzkie – Smart region with smart cities – Water challenges, tytuł wystąpienia Wydział Organizacji i Zarządzania, Politechnika Łódzka, „Projekt MONSUL – dobre praktyki w gospodarce wodnej”.
3. **23.06.2022**, Prelegent podczas Forum Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju – Łódzkie 2022, udział w panelu „Wyzwania w obszarze redukcji śladu węglowego w organizacji”
4. **30.05.2023**, Prelegent podczas Kongresu Energetyczna Regeneracja Miast, Łódź, udział w panelu „Techniki i technologie w energetycznej transformacji miast”
5. **19-20.10.2023**, 8. Forum inteligentnego rozwoju, Uniejów, tytuł wystąpienia: „HECATE – lot w stronę neutralności klimatycznej”
6. **6.06.2024**, Prelegent podczas Międzynarodowego Forum Gospodarczego organizowanego przez Europejski Ośrodek Rozwoju Gospodarki, Łódź, uczestnictwo w panelu „Potencjał polskich innowacji”
7. **21.06.2024**, Gospodarka obiegu zamkniętego w przemyśle, Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności Politechniki Łódzkiej, tytuł wystąpienia: „Rola oceny cyklu życia we wdrażaniu gospodarki o obiegu zamkniętym”
8. **27.08.2024**, Konferencja Łódzkiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej, Łódź, tytuł wystąpienia: „Ślad węglowy a przewaga konkurencyjna”
9. **21-22.01.2025**, III Kongres Liderów Optymalizacji Produkcji, Dekarbonizacja, Obieg Zamknięty, Zielona Energia, Mszczonów, tytuł wystąpienia „Ocena cyklu życia we wdrażaniu gospodarki o obiegu zamkniętym”

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora 1 raz prezentowałam wyniki swoich badań na sesji posterowej:

1. **5-9.09.2016** XXII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Spała, Polska, poster: Method for on-line measurement of water quality indicators in the Sulejow Reservoir.

13. Międzynarodowe i krajowe nagrody, wyróżnienia i medale za działalność naukową

1. **01.05.2012-31.12.2013 – Otrzymałam stypendium naukowe** dla najlepszych doktorantów z Zakresu Nowych Technologii. Projekt realizowany w ramach projektu POKL działanie 8.2. Transfer wiedzy, poddziałanie 8.2.1 Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.
2. **12.2014 – Zostałam Laureatką Konkursu "Ekologiczny doktor"**, nagroda przyznawana jest przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Łodzi dla najlepszych pod względem naukowym i praktycznym, rozpraw doktorskich z dziedziny ochrony środowiska (Załącznik 8).
3. **Czterokrotnie otrzymałam nagrodę wspierającej doskonałość naukową** w ramach programu „Inicjatywa doskonałości-uczelnia badawcza” za I kwartał roku 2021, za II kwartał 2021 roku, IV kwartał 2022 roku oraz II kwartał 2024 roku (Załącznik 8).
4. **2.11.2022 otrzymałam Dyplom Rektora Politechniki Łódzkiej** za wkład wniesiony w umiędzynarodowienie Politechniki Łódzkiej poprzez realizację projektu Hybrid Electric Regional Aircraft Distribution Technologies (Załącznik 8).
5. **24.11.2023 – Otrzymałam nagrodę w kategorii Naukowiec Przyszłości w kategorii „Kobieta nauki, która zmienia świat”**, za prowadzenie innowacyjnych badań naukowych mających wymierny wpływ na rozwój przedsięwzięć z zakresu ochrony środowiska. Nagrodę przyznano za badania wody, a także zaangażowanie w międzynarodowe projekty badawcze, w tym aktualnie za prace w ramach projektu o akronimie HECATE, którego celem jest rozwój nowych technologii dostarczania energii elektrycznej w samolotach hybrydowych. Podkreślono postawę nastawioną na aktywne budowanie wśród społeczeństwa pozytywnego oraz interesującego wizerunku polskiej nauki i prac B+R (Załącznik 8).
6. **24. 11. 2023 – Odebrałam nagrodę dla koordynatora projektu HECATE na Politechnice Łódzkiej za Projekt przyszłości – HECATE, Hybrid Electric regional Aircraft distribution Technologies”. Zespół realizujący projekt został Laureatem Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2023 w kategorii: Projekt Przyszłości** za pomysł i przyszłe wyniki przedsięwzięcia, które mogą skutkować pozytywnym wpływem na rozwój nowych technologii dostarczania energii elektrycznej dla przemysłu lotniczego. Nagroda przyznana została również za otwarte podejście do promocji i komunikacji ze społeczeństwem, w celu przedstawiania korzyści wynikających z realizowanego rozwiązania (Załącznik 8).
7. **W marcu 2023 roku zostałam nominowana przez Europejski Ośrodek Rozwoju Gospodarki do ogólnopolskiej nagrody gospodarczej AMBASADOR**

INNOWACYJNOŚCI za „wkład w rozwój innowacji w Polsce, za przyszłościowe, nieszablonowe myślenie, pionierskie projekty, nowe idee i niezwykle rozwiązania. Przede wszystkim za budowanie pozytywnego wizerunku polskich innowacji, które są na bardzo wysokim poziomie i niejednokrotnie wyprzedzają światowe trendy” (Załącznik 8).

8. **W styczniu 2024 roku otrzymałam nominację do tytułu Lider Inteligentnego Rozwoju 2024.** Nominację przyznano za wyróżniające się osiągnięcia na płaszczyźnie wdrażania innowacji do praktyki gospodarczej i postawę ukierunkowaną na dzielenie się wiedzą oraz doświadczeniem z przedstawicielami rynku. W liście nominacyjnym wskazano, że nominowany prezentuje pozytywne podejście względem promocji i komunikacji sukcesów wynikających z prowadzonej działalności wśród opinii publicznej. Reprezentowane podejście ma służyć inteligentnemu rozwojowi społeczno-gospodarczemu (Załącznik 8).
9. W tym samym roku otrzymałam też **nominację do tytułu Polski Innowator 2024 w kategorii: Osobistość Nauki** przyznawaną przez Polskie Centrum Rozwoju Innowacji oraz **nominację w Kategorii Osobowość roku Nauka** przyznawaną przez **Dziennik Łódzki**. Nominacja została przyznana za prowadzenie innowacyjnych badań naukowych mających wymierny wpływ na rozwój przedsięwzięć z zakresu ochrony środowiska (Załącznik 8).
10. **22.11.2024 - Otrzymałam nagrodę Symbol Naukowca Roku 2024** za projekt pn.: „HECATE – Hybrid Electric Regional Aircraft Distribution Technologies”. [Symbol - Nagroda dla tych, którzy zmieniają świat na lepsze](#) (Załącznik 8).
11. **13.11.2024 - Otrzymałam z rąk Rektora Politechniki Łódzkiej brązowy medal** za długoletnią służbę.
12. **W styczniu 2025 roku konsorcjum realizujące projekt Fibre4Yards** zostało wyróżnione prestiżową nagrodą JEC Innovation Awards w kategorii **Maritime Transport and Shipbuilding** (<https://www.jec-world.events/program/innovation-awards>).

14. Szkolenia i kursy

W trakcie swojej kariery naukowej ukończyłam szereg kursów, m.in.

- Zarządzanie projektem badawczo-rozwojowym w praktyce (16.09.2014, Warszawa)
- Prezentacja Wyników badań naukowych (17-18.11.2014, Warszawa)
- Effective LCA with SimaPro (2-3 Marca 2016, Amersfoort, Holandia)
- SimaPro and LCA:Essentials + In-Depth by PRé 25.09.2020 (online)
- LTS Modeling Complex Disposal Options 31.03.2021 (online)
- LTS Training: Interpretation 04.11.2021 (online)
- Social media a praca naukowca, w ramach projektu ZPU3 dla kadry dydaktycznej 19.05.2022 (on-line)
- Product Sustainability LCA FE Software – Jump Start Training, 13-14.03.2023 (online)

15. Dorobek naukowy opublikowany przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

a) Publikacje

1. **A. Ziemińska-Stolarska**, J. Skrzypski, Evaluation of the content of chlorophenols and their derivatives in water supply systems, Proceedings of ECOpole, 2010, vol. 4, No. 2, pp. 297-303, ISSN 1898-617X.
2. **A. Ziemińska-Stolarska**, J. Skrzypski, Review of mathematical models of water quality, Ecological chemistry and Engineering S, 2011, vol. 19, No. 2, pp. 197-211, ISSN 1898-6196. IF: 0,614, liczba punktów ministerialnych: 20; Kategoria A
3. **A. Ziemińska-Stolarska**, I. Zbiciński, I. Imbierowicz, J. Skrzypski, Waterpraxis as a tool supporting protection of water in the Sulejow Reservoir, Desalination and Water Treatment Journal, 2013, DOI:10.1080/19443994.2013.768043, IF: 0,987, liczba punktów ministerialnych: 20; Kategoria A
4. M. Jaskulski, A. Szmidt, **A. Ziemińska-Stolarska**, Bathymetric map of the Sulejow Reservoir 1:25000. Łódź: Ed. University of Lodz, Faculty of Geographical Sciences, University of Lodz, Faculty of Process and Environmental Engineering, 2013 (ISBN 978-83-916728-8-4).

b) Wystąpienia na konferencjach naukowych przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora (wystąpienia w języku angielskim)

- 1.14-19.09.2010, ECSA 47 Estuarine & Coastal Sciences Association, Figueira da Foz, Portugalia, **poster**: From Theory and Plans to Eco-efficient and sustainable practices to improve the Status of the Baltic Sea.
- 2.14-17.10.2010, Central European Conference ECOpole'10, Piechowice, Polska **prezentacja**: Analysis of the selected problems of lowland reservoirs on the example of the Sulejów and Jeziorsko Reservoir, eISSN 2084-4557 (**prezentacja uzyskała nagrodę za najlepszy referat podczas sesji "Young Scientists"**).
- 3.17-19.01.2011, Symposium on Climate Change Challenges in River Basin Management, Oulu, Finlandia. **prezentacja**: Analysis of existing water protection action plans and realized water protection project at Sulejów Reservoir region in Poland.
- 4.11-15.04.2011, Ecosystems and Sustainable Development, Alicante, Hiszpania **prezentacja**: Evaluation of the ecological status of the artificial water reservoirs in Poland in terms of nutrient pollution.
- 5.30-31.05.2011, Workshop on River Basin Management in the Baltic Sea Region, Lulea, Szwecja, **prezentacja**: Analysis of existing water protection action plans at Sulejów Reservoir in Poland.
- 6.15-16.06.2011, Climate Change and Water Management - Meeting the Challenges in The Barents Region, Archangielsk, Rosja. **Keynote speaker, temat prezentacji**: Analysis of existing water protection action plans and realized water protection project at the Sulejów Reservoir region in Poland.

7.25-29.09.2011, 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems, Dubrovnik, Chorwacja. **prezentacja:** Waterpraxis as a Tool Supporting Protection of Water in the Sulejow Reservoir in Poland.

8.13-15.10.2011, Central European Conference ECOpole'11, Zakopane, Polska **prezentacja:** From theory and plans to eco-efficient and sustainable practices to improve the status of the Baltic Sea.

9.11-12.01.2012, Waterpraxis final seminar Wilno, Litwa, **prezentacja:** Eutrophication problems in Poland – How to improve the status of wastewater treatment at the Sulejów Reservoir?

10.16-18.04.2012, Konferencja doktorantów Baltic University Programme, Rogów, Polska, **prezentacja:** Analiza wpływu zmian strumieni biogenów na stopień eutrofizacji wód w Zbiorniku Sulejowskim.

11.10-13.10.2012, Central European Conference ECOpole'12, Zakopane, Polska **prezentacja:** Analysis of the impact of changes in the flux of biogenic substances on water eutrophication in the Sulejow Reservoir.

12.02-06.09.2013, XXI Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Kołobrzeg, Polska, **poster:** Analysis of flow hydrodynamics in the Sulejow Reservoir.

13.17-19.09.2013, Konferencja Ecohydrology, Biotechnology and Engineering Towards Harmony between Biogeosphere and Society on the basis of Longterm Ecological Research, Łódź, Polska, **prezentacja:** Analysis of the flux of biogenic substances in the dam reservoir on the example of Sulejow Reservoir.

14.22-27.09.2013, 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Dubrovnik, Chorwacja, **prezentacja:** 3D CFD Modelling of Water Quality in the Sulejow Reservoir (Central Poland)

16. Analiza bibliometryczna dorobku naukowego (stan na dzień 17.02.2025) - według raportu przygotowanego przez bibliotekę Politechniki Łódzkiej

Dane według bazy Web of Science Core Collection	
Liczba publikacji indeksowanych w bazie	19
Liczba publikacji cytowanych	16
Liczba cytowań	126
Index Hirscha	7
Analiza cytowań z wyłączeniem autocytowań	
Liczba publikacji cytowanych	15
Liczba cytowań z wyłączeniem autocytowań	108
Sumaryczny współczynnik Impact Factor (IF) z roku publikacji	38,06
Sumaryczny współczynnik Impact Factor (IF) z roku 2023	34,8
Suma punktów za publikacje w czasopismach wg punktacji MNiSW/MEiN z roku publikacji	1376
Suma punktów za publikacje w czasopismach wg wykazu MNiSW z dn. 05.01.2024 r.	1390
Dane według bazy Scopus	
Liczba publikacji indeksowanych w bazie	20
Liczba publikacji cytowanych	17
Liczba cytowań	162
Index Hirscha	7
Analiza cytowań z wyłączeniem autocytowań	
Liczba publikacji cytowanych	17
Liczba cytowań z wyłączeniem autocytowań	143
Index Hirscha z wyłączeniem autocytowań	6
Sumaryczny współczynnik Impact Factor (IF) z roku publikacji	38,06
Sumaryczny współczynnik Impact Factor (IF) z roku 2023	34,8
Suma punktów za publikacje w czasopismach wg punktacji MNiSW/MEiN z roku publikacji	1390
Suma punktów za publikacje w czasopismach wg wykazu MNiSW z dn. 05.01.2024 r.	1410

Bibliografia:

Airbus. (2020). *Global Market Forecast: 2020-2039*. Airbus. <https://www.airbus.com/>

Ambrose, R. B., Wool, T. A., & Martin, J. L. (1993). WASP5 and HSPF: User's Manual for WASP5.1, Water Quality Analysis Simulation Program, and Hydrological Simulation Program—Fortran. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

Consoli, F. (1993). *Guidelines for Life-cycle Assessment: A "Code of Practice"*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

Danilchanka O., Mekalanos J.J. (2013) Cyclic dinucleotides and the innate immune response. *Cell*;154(5):962-970. doi: 10.1016/j.cell.2013.08.014. PMID: 23993090; PMCID: PMC3931520.

Di Toro, I., Connolly, J., Winfield, T. (1984). *Ambrose, R.B., et al. (1984).*

Dojlido, J. (1995). *Chemia wód powierzchniowych*. Białystok: Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko.

Gładyszewski, K., Skiborowski, M. (2018). Additive manufacturing of packings for rotating packed beds. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 127, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.02.024>

Griffiths, O.G., O'Byrne, J.P., Torrente-Murciano, L., Jones, M.D., Mattia, D., McManus, M.C. (2013). Identifying the largest environmental life cycle impacts during carbon nanotube synthesis via chemical vapour deposition. *Journal of Cleaner Production*, 42, 87-96.

Guzik, K., Burkowicz, A., Szlugaj, J. (2022). Gospodarka wybranymi surowcami krytycznymi stosowanymi w fotowoltaice w krajach UE. In *XXXV KONFERENCJA Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej* (pp. 1-14). Zakopane: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.

Hischier, R., Hellweg, S., Capello, C., et al. (2005). Establishing life cycle inventories of chemicals based on differing data availability. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, 181-189. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.7>

International Air Transport Association (IATA). (2020). *The Role of Aviation in Global Carbon Emissions*. Retrieved February 20, 2025, <https://www.iata.org/en/pressroom/2020/2020-10-06-01/>

Jesze, R., et al. (2009). *Klimat dla Polski Polska dla klimatu 1988–2018–2050*. Instytut Ochrony Środowiska PAN.

Hussen, B. M., Taheri, M., Yashooa, R. K., Abdullah, G. H., Abdullah, S. R., Kheder, R. K., & Mustafa, S. A. (2024). Revolutionizing medicine: Recent developments and future prospects in stem-cell therapy. *International Journal of Surgery*, 110(12), 8002-8024. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000002109>. PMID: 39497543; PMCID: PMC11634165.

Pennington, D., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 5-15.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.P., Suh, S., Weidema, B.P., & Pennington, D.W. (2004). Life cycle assessment part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 1-4.

Toxopeus, M.E., de Koeijer, B.L.A., & Meij, A.G.G.H. (2015). Cradle to Cradle: Effective Vision vs. Efficient Practice? *Procedia CIRP*, 29, 56-61.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2020). Race to Zero: Achieving Net Zero Emissions by 2050.

UNFCCC (2015). The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of Carbon Footprint. In *Pertsova, C. C. (Ed.), Ecological Economics Research Trends* (pp. 47-58). Nova Science Publishers.

Wojtasik, J., Gładyszewski, K., et al. (2018). Enzyme-enhanced CO₂ absorption process in rotating packed bed. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(5), 4790-4799. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0647-8>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

European Commission. (2014). *Ecodesign Your Future: How Ecodesign Can Help the Environment by Making Products Smarter*. European Commission.

European Commission. (2015). *Plan działania Komisji dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym, COM (2015) 614*.

Polska Norma PN-EN ISO 14040:2009. (2009). *Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura*.

European Commission. (2013). *Zalecenie Komisji z dnia 9 kwietnia 2013 r. (2013/179/UE) w sprawie stosowania wspólnych metod pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej*. <http://data.europa.eu/eli/reco/2013/179/oj>

Strony internetowe:

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.068>.

<https://ecoinvent.org/>

<https://www.acs.org/greenchemistry/research-innovation/endangered-elements/indium.html>

<https://www.openpr.com/news/1256941/methyl-diethanolamine-market-top-key-players-eastman-chemical-company-amines-plasticizers-ltd-and-basf-se.html>

<https://www.setac.org/>