

Autoreferat

Tytuł osiągnięcia naukowego:

Procesy i układy oparte na technologii mikrobiologicznych ogniw paliwowych dla gospodarki obiegu zamkniętego

Dr inż. Grzegorz Pasternak
Katedra Inżynierii Procesowej i Technologii Materiałów
Polimerowych i Węglowych
Wydział Chemiczny
Politechnika Wrocławska

Contents

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).	3
4.1. Zestawienie publikacji składających się na osiągnięcie naukowe	4
4.2. Wprowadzenie	6
4.3. Technologia procesów membranowych w MFC	9
4.3.1. Ogniwa oparte na materiałach ceramicznych	9
4.3.2. Ogniwa oparte na materiałach polimerowych	14
4.4. Elektrolit MFC jako czynnik bakteriobójczy i wirusobójczy.....	15
4.5. Rezystancja zewnętrzna jako kluczowy czynnik rozruchu ogniwa	17
4.6. Zastosowania układów opartych na MFC	19
4.6.1. Wysokoprzepustowa platforma MFC do badań mikroorganizmów	19
4.6.2. Autonomiczny, samozasilający się biosensor jakości wody powierzchniowej	20
4.6.3. Instalacja pilotażowa PEE POWER®	22
4.7. Podsumowanie najważniejszych osiągnięć badawczych	23
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	24
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	26
6.1. Osiągnięcia dydaktyczne	26
6.2. Osiągnięcia organizacyjne	27
6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę	28
7. Inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	29
7.1. Nagrody i wyróżnienia	29
7.2. Podsumowanie aktywności zawodowej	29
7.3. Plany badawcze	32

1. Imię i nazwisko.

Grzegorz Pasternak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.

Edukacja

- **2007-2011.** Dr inż., Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Specjalność: Mikrobiologia Techniczna, Biotechnologia Środowiska. “Biodegradacja związków NSO-heterocyklicznych w warunkach tlenowych”. Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Polska. **Wyróżnienie, top 5% absolwentów.**
Promotor: Dr hab. Barbara Kołwzan, prof. nadzw.
- **2002-2007.** Mgr inż., Ochrona Środowiska. “Mikroorganizmy degradujące związki nitroaromatyczne”. Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Polska.
Promotor: Dr hab. Barbara Kołwzan, prof. nadzw.

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

Przebieg kariery zawodowej

- **Październik 2018 - obecnie.** Adiunkt, kierownik Laboratorium Mikrobiologicznych Układów Elektrochemicznych, Katedra Inżynierii Procesowej i Technologii Materiałów Polimerowych i Węglowych, **Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska.**
- **Maj 2016 – Sierpień 2018.** Research Fellow, Laboratory of Artificial Biology, Centre for Integrative Biology, **University of Trento, Trento, Italy.**
- **Marzec 2014 – Kwiecień 2016.** Research Associate, Bristol BioEnergy Centre, Bristol Robotics Laboratory, **University of the West of England, Bristol, United Kingdom.**
- **Wrzesień 2011 – Marzec 2014.** Asystent naukowo-dydaktyczny, **Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska.**

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

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego jest osiągnięcie naukowe pod tytułem „Rozwój technologii mikrobiologicznych ogniw paliwowych do zastosowań w

inżynierii biochemicznej, ochronie środowiska i gospodarce obiegu zamkniętego”, obejmujące monotematyczny cykl 12 publikacji.

4.1. Zestawienie publikacji składających się na osiągnięcie naukowe

Cykl publikacji składa się z publikacji o sumarycznym **IF=83,874** (podane zgodnie z rokiem publikacji; obecny IF=102,559), średnim **IF=6,990** (obecnie IF=8,547), sumie punktów **MNiSW=1030** oraz **łącznej liczbie cytowań=457** (Scopus); 414 (Web of Science) oraz 577 (Google Scholar). Przedstawiony cykl obejmuje prace opublikowane w czasopismach z zakresu inżynierii chemicznej, w tym czasopismach przyporządkowanych do dyscypliny Inżynieria Chemiczna o sumarycznym IF=52,072 (6 publikacji, wg wykazu MEiN z 1 grudnia 2021). **Wkład własny w powstanie omawianych publikacji został szczegółowo opisany w załączniku 4.**

Poniższe prace uszeregowane zostały kierując się przesłankami merytorycznymi. Kolejność ich powstawania różni się zatem od kolejności przedstawionej w zestawieniu. Symbolem “H” oznaczyłem prace z cyklu habilitacyjnego, przy czym symbolem * oznaczyłem publikacje, w których pełniłem rolę autora korespondencyjnego. Pozostałe prace, w tym prace własne cytowane są w sposób standardowy, przy czym cytowania prac własnych z poza cyklu wyszczególniłem poprzez **pogrubienie**.

H1. Pasternak, G., Greenman, J., Ieropoulos, I. (2016). Comprehensive Study on Ceramic Membranes for Low-Cost Microbial Fuel Cells. ChemSusChem, 9(1), 88–96.

IF(2016)=7,226; IF(obecny)= 9,140; MNSiW=140 pkt. Liczba cytowań=103

H2. Pasternak, G., Greenman, J., Ieropoulos, I. (2016). Regeneration of the power performance of cathodes affected by biofouling. Applied Energy 173, 431–437.

IF(2016)=7,182; IF(obecny)=11,446; MNSiW=200 pkt. Liczba cytowań=43

H3. G Pasternak*, N Ormeno-Cano, P Rutkowski, Composite, recycled polypropylene-coated ceramic membranes for microbial fuel cells. Chemical Engineering Journal 425 (2021) 130707.

IF(2021)=16,744; IF(obecny)=16,744; MNSiW=200 pkt. Liczba cytowań=6

H4. G. Pasternak*, Y. Yang, B.B. Santos, F. Brunello, M.M. Hanczyc, A. Motta. (2019). Regenerated silk fibroin membranes as separators for transparent microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 126, 146-155.

IF(2019)=4,722; IF(obecny)= 5,760; **MNSiW=100 pkt.** **Liczba cytowań=21**

H5. Ieropoulos, I., **Pasternak G.**, Greenman, J. (2017). Urine disinfection and in situ pathogen killing using a Microbial Fuel Cell cascade system, *PLOS ONE*, 12(5): e0176475.

IF(2017)=2,766; IF(obecny)= 3,752; **MNSiW=100 pkt.** **Liczba cytowań=33**

H6. G Pasternak, J Greenman, I Ieropoulos, Removal of Hepatitis B virus surface HBsAg and core HBcAg antigens using microbial fuel cells producing electricity from human urine, *Scientific Reports*, 2019, 9 (1), 1-8.

IF(2019)=3,998; IF(obecny)= 4.996; **MNSiW=140 pkt.** **Liczba cytowań=5**

H7. I Ieropoulos, O Obata, **G Pasternak**, J Greenman, Fate of three bioluminescent pathogenic bacteria fed through a cascade of urine microbial fuel cell. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2019, 46 (5), 587–59.

IF(2019)=2,824; IF(obecny)= 4.258; **MNSiW=100 pkt.** **Liczba cytowań=9**

H8. I Merino-Jimenez, O Obata, **G Pasternak**, I Gajda, J Greeman, I Ieropoulos. Effect of microbial fuel cell operation time and membrane thickness on the disinfection efficacy of electrochemically synthesised catholyte from urine. *Process Biochemistry*, 101, 2021, 294-303.

IF(2021)=4,885; IF(obecny)=4,885; **MNSiW=70 pkt.** **Liczba cytowań=6**

H9. G. Pasternak*, J. Greenman, I. Ieropoulos. (2018). Dynamic evolution of anodic biofilm when maturing under different external resistive loads in microbial fuel cells. Electrochemical perspective. *Journal of Power Sources*, 400, 392-401.

IF(2018)=7,467; IF(obecny)= 9.794; **MNSiW=140 pkt.** **Liczba cytowań=40**

H10. L Szydłowski, J Ehlich, I Goryanin, **G Pasternak***, High-throughput 96-well bioelectrochemical platform for screening of electroactive microbial consortia. Chemical Engineering Journal. 427, 131692.

IF(2021)=16,744; IF(obecny)=16,744; **MNSiW=200 pkt.** Liczba cytowań=2

H11. Pasternak*, G., Greenman, J., Ieropoulos, I. (2017). Self-powered, autonomous Biological Oxygen Demand biosensor for online water quality monitoring. Sensors and Actuators B: Chemical, 244, 815–882.

IF(2017)=5,667; IF(obecny)=9.221; **MNSiW=140 pkt.** Liczba cytowań=60

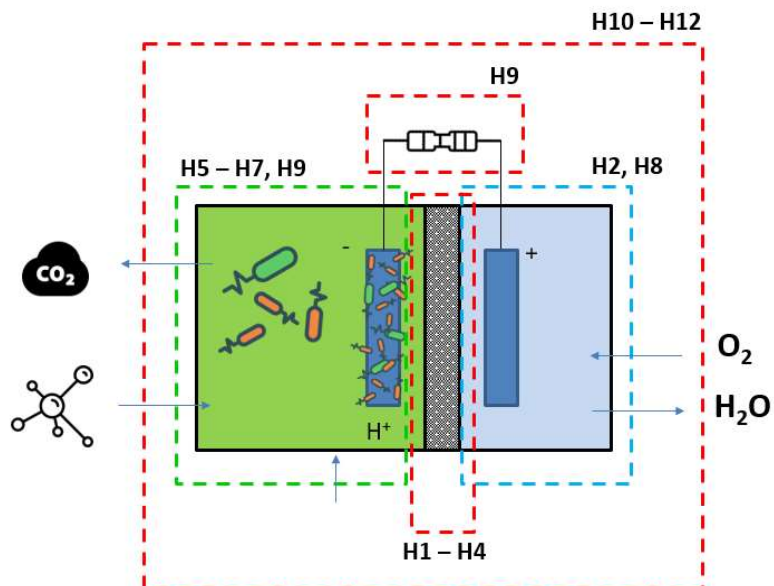
H12. Ieropoulos, I., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., **Pasternak, G.**, Sanchez-Herranz D., Greenman, J. (2015). Pee Power Urinal - Microbial Fuel Cell Technology Field Trials In The Context Of Sanitation. Environmental Science: Water Research and Technology. 2 (2), 336-343.

IF(2015)=3,649; IF(obecny)= 5.819; **MNSiW=100 pkt.** Liczba cytowań=129

4.2. Wprowadzenie

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe (MFC – *Microbial Fuel Cell*), które dla uproszczenia będą w niniejszym autoreferacie nazywane również reaktorami MFC, to urządzenia, w których elektroaktywne mikroorganizmy przetwarzają związki organiczne w energię elektryczną. Możliwość jednoczesnej degradacji materiałów odpadowych oraz energii elektrycznej sprawia, że technologia MFC otwiera nowe perspektywy dla procesów, które dotychczas wymagały dostarczania energii elektrycznej. W szerszej perspektywie, MFC oraz inne typy układów bioelektrochemicznych (BES) umożliwiają nie tylko pozyskiwanie prądu elektrycznego jako produktu ubocznego procesu przetwarzania odpadów, ale także na pozyskiwanie wielu wartościowych produktów oraz odzysk surowców z odpadów stałych oraz płynnych.

MFC wykorzystywane mogą być do wielu zastosowań takich jak biosensory środowiskowe, odzysk surowców oraz wytwarzanie prądu elektrycznego ze ścieków, moczu oraz innego rodzaju odpadów, a także odsalanie wody morskiej czy wiązanie dwutlenku węgla i elektrosynteza związków organicznych. Technologie MFC oraz pozostałych typów BES mogą więc stać się w przyszłości jednym z kluczowych elementów umożliwiających osiągnięcie celów gospodarki obiegu zamkniętego.



Rysunek 1. Uproszczony schemat mikrobiologicznego ogniwka paliwowego w układzie dwukomorowym oraz schemat przedstawiający wkład własny w rozwój technologii, opisywany jako monotematyczny cykl publikacji.

Przebieg procesu produkcji prądu przedstawiłem na Rysunku 1, na przykładzie ogniwka w układzie dwukomorowym. Zasada działania systemów opartych na MFC opiera się na dwóch elektrodach: anodzie oraz katodzie. W komorze anody dochodzi do utleniania materii organicznej z wykorzystaniem mikroorganizmów jako biokatalizatorów reakcji. Proces anodowy odbywa się w warunkach beztlenowych. Powstałe podczas procesu utleniania elektrony transportowane są przez mikroorganizmy na powierzchnię anody i dalej - poprzez obwód elektryczny wędrują do katody. Kolejny produkt biokatalitycznego utleniania paliwa w MFC – protony – wędrują zgodnie z różnicą potencjałów w kierunku katody, poprzez membranę, separator lub bezpośrednio przez warstwę w przypadku ogniw bezmembranowych. Na powierzchni katody, z udziałem protonów i elektronów zachodzi proces elektrochemicznej redukcji tlenu (najczęściej) lub innego czynnika utleniającego. Redukcja tlenu prowadzi do powstawania wody lub jonów hydroksylowych. Reakcje katodowe zachodzą z wykorzystaniem katalizatorów, wśród których najczęściej stosowane są materiały węglowe. Katoda może znajdować się w przeznaczony do tego celu komorze, wypełnionej elektrolitem lub zostać osadzona bezpośrednio na separatorze lub membranie. Dzięki różnicy potencjałów oraz transportowi elektronów przez obwód, produktem ubocznym utleniania materii organicznej jest prąd elektryczny. Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe wyposażone są zatem w szereg elementów funkcjonalnych wpływających na efektywność procesu, wśród których szczególne znaczenie mają elektrody: anoda oraz katoda, membrana lub separator, biokatalizator (mikroorganizmy w postaci biofilmu oraz planktoniczne), konstrukcja ogniwka oraz element elektryczny, który reguluje transfer ładunku pomiędzy elektrodami.

Elementy funkcjonalne, które odgrywają kluczową rolę w pracy ogniwka, mają fundamentalne znaczenie również w pozostałych typach układów bioelektrochemicznych (BES), stanowią bowiem elementy wspólne dla wielu technologii wykorzystujących reakcje oparte na elektroaktywnych mikroorganizmach. W mikrobiologicznych elektrolizerach (MEC) wykorzystywany jest podobny

mechanizm do MFC, z tą różnicą, że niewielka ilość prądu jest dodawana do układu z zewnątrz w celu wytworzenia wodoru na katodzie. Jeśli typowy reaktor MFC wyposażymy w dodatkową komorę pomiędzy anodą a katodą, różnica potencjałów może posłużyć do separacji anionów i kationów w zasolonym medium takim jak woda morska. Ogniwo takie nazywamy mikrobiologicznym ogniwem odsalającym (MDC). Zarówno z udziałem anody jak i katody BES mogą posłużyć do syntezy cennych związków organicznych lub nieorganicznych w procesach nazywanych mikrobiologiczną elektrosyntezą lub elektrofermentacją. W jednym z takich procesów może dochodzić do biosyntezy surfaktantów. Ich wpływ na działanie BES oraz możliwości bioelektrochemicznej syntezy szczegółowo omówiłem we wspólnej pracy z prof. Rosenbaum oraz dr Askitosari (Pasternak et al., 2020a) i jest to obecnie jeden z wiodących tematów w moim zespole badawczym. Pozostałe przykłady obejmują m.in. syntezę alkoholi, octan lub acetoinę (Patil et al., 2015; Förster et al., 2017; Mayr et al., 2019).

Wszystkie powyższe procesy w układach MFC oraz pozostałych układach bioelektrochemicznych bazują na aktywności mikroorganizmów elektroaktywnych, zarówno planktoniczne jak i tworzące zwartą strukturę na powierzchni elektrody, czyli biofilm. Zarówno kompozycja gatunkowa jak i struktura biokatalizatora jest odmienna w zależności od wymaganych w układzie reakcji oraz czynników które ją kształtują. Wynika to m.in. ze współistnienia trzech kluczowych dróg przekazywania elektronów, czyli bezpośredniego transferu elektronów do elektrody z powierzchni ściany komórkowej (DET), transferu wspomaganego poprzez rozpuszczalne przenośniki elektronów takie jak żelazo czy związki chinonowe oraz przenoszenie elektronów za pomocą nanowłókien bakteryjnych. W tym skomplikowanym układzie poszczególne komórki bakteryjne oraz grupy mikroorganizmów współpracują ze sobą przeprowadzając kolejne etapy reakcji lub/i przekazując sobie elektrony. Dodatkowo mikroorganizmy rozwijają się w środowisku, w którym wspomniane wcześniej abiotyczne elementy funkcjonalne oraz mechanizmy kontrolne sprawiają, że układy typu MFC są bogatą mieszaniną reakcji fizykochemicznych na poziomie subkomórkowym, komórkowym oraz poziomie konsorcjum.

W związku z powyższym podnoszenie poziomu technologicznego mikrobiologicznych ogniw paliwowych odbywa się poprzez ciągłe usprawnianie ich elementów funkcjonalnych oraz sposobu konstrukcji. Wykorzystuje się m.in. inżynierię materiałową w celu usprawnienia efektywności lub żywotności membran (Hernández-Fernández et al., 2015; **Pasternak et al., 2022**), elektrod (Erbil et al., 2018; Chong et al., 2019), inżynierię biochemiczną w celu zwiększenia wydajności pracy mikroorganizmów (Askitosari et al., 2019), a także modelowanie i rozwój układów peryferyjnych (Gadkari et al., 2018; Tsompanas et al., 2019). Rozwój technologii MFC wymaga zatem zintegrowanego podejścia do badań, podobnie jak w szeroko pojętej inżynierii bioprosesowej jednak wzbogaconego o elektrochemiczną kontrolę prowadzonego procesu.

Technologia MFC oraz inne technologie układów bioelektrochemicznych, pomimo faktu, iż w chwili obecnej znajdują się w fazie intensywnych prac badawczych i badawczo-rozwojowych, mają przed sobą szerokie możliwości zastosowań w inżynierii chemicznej i biochemicznej oraz szerzej w szeroko pojętej ochronie środowiska (Fu et al., 2010; Ieropoulos et al., 2012; Toczyłowska-Mamińska et al., 2020). Technologia MFC, może całkowicie odmienić sposoby oczyszczania ścieków oraz kontroli procesów biochemicznych, które do tej pory odbywały się w ugruntowany sposób,

z wykorzystaniem dobrze znanych i zbadanych metod. Wspomniane wcześniej przykłady możliwości zastosowań technologii MFC chciałbym uzupełnić o przykłady badań własnych, zarówno z cyklu habilitacyjnego, jak i z poza niego. Wszystkie prace z tematyki MFC powstały po uzyskaniu stopnia doktora, co wiąże się ze zmianą tematyki badawczej w związku 4,5-letnim okresem pracy w instytucjach zagranicznych.

Celem naukowym prowadzonych przeze mnie badań było podniesienie sprawności mikrobiologicznych ogniw paliwowych oraz praktyczne wykorzystanie procesów elektrochemicznych zachodzących w ogniwach. Osiągnięcie tego celu wiązało się z czterema zasadniczymi filarami:

- Technologią procesów membranowych w MFC.
- Oceną możliwości wykorzystania elektrolitów (anionitu i kationitu) w celu unieszkodliwiania czynników chorobotwórczych (mikroorganizmy i wirusy).
- Badaniami nad usprawnieniem rozruchu i działania układów MFC.
- Konstrukcją gotowych układów opartych na MFC w celu ich praktycznego wykorzystania.

4.3. Technologia procesów membranowych w MFC

Większość typów konstrukcji MFC, ale także pozostałych układów bioelektrochemicznych wykorzystuje membrany oraz szerzej – separatory jako kluczowy element funkcjonalny ogniw, umożliwiające transport protonów do katody, a także jako barierę uniemożliwiającą zwarcie elektrod, a także dyfuzję wsteczną tlenu oraz przenikanie substratów. Jeden z podziałów membran obejmuje ich materiał strukturalny, a więc podział na materiały organiczne, nieorganiczne oraz materiały mieszane. W swojej pracy szczególną uwagę poświęciłem materiałom niskokosztowym.

4.3.1. Ogniwa oparte na materiałach ceramicznych

Prace nad membranami ceramicznymi rozpocząłem podczas pierwszego zagranicznego stażu w Bristol BioEnergy Centre (University of the West of England, Bristol Robotics Laboratory), w ramach projektu, w którym zatrudniony byłem przez ponad dwa lata. Kierownikiem projektu („Urinetricity++”, finansowanym przez Bill & Melinda Gates Foundation) był prof. Ioannis Ieropoulos, współwykonawcą natomiast prof. John Greenman.

Szczególną uwagę poświęciłem pracy z materiałami ceramicznymi. Wykorzystanie membran ceramicznych zapoczątkowane było przez hinduską badaczkę Dr Manaswini Behera (Behera and Ghangrekar, 2011). Ich najważniejszą zaletą był niski koszt, a także wysoka efektywność. Ich wykorzystanie zapewniało również odpowiednią wilgotność po stronie katody. Prostota utrzymania (czyli brak konieczności nawadniania katody powietrznej) oraz niski koszt sprawiają, że tego typu materiały są dobrym kandydatem do ich późniejszego wykorzystania w układach w skali technologicznej. Na tym etapie rozwoju MFC nie było wiadomo, jak rodzaj materiału, jego właściwości oraz skład wpływają na parametry pracy ogniwa. Jedyną dostępną publikacją, w której porównano zachowanie się dwóch typów membran ceramicznych była praca z grupy w Bristolu (Winfield et al., 2013b), w której badano głównie efektywność materiałów w krótkim okresie.

Tabela 1. Koszt oraz charakterystyka materiałów ceramicznych.

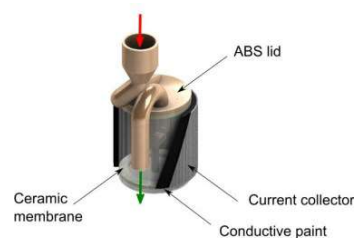
Table 1. Performance and cost characteristics of the ceramic membranes, which include values normalised to the volume and anode and cathode surface area. The highest and lowest values are in bold.									
Membrane material	R_{int}	OCV	Power to volume	Power to anode	Power to cathode	Absolute power	Wall thickness	Porosity	Cost of membrane
	[Ω]	[mV]	[$W m^{-3}$]	[$mW m^{-2}$]	[$mW m^{-2}$]	[μW]	[mm]	[%]	[$GBP m^{-2}$]
	min.	max.	max.	max.	max.	max.			
mullite	500	550.0	4.98	3.94	15.44	56.7	4	27	13.61
earthenware	304	532.3	6.85	5.43	32.32	78.1	3.5	14	4.14
pyrophyllite	905	634.8	6.93	6.16	25.69	44.4	2	1.8–2	387.96
alumina	2000	499.7	2.60	2.06	11.25	29.7	3	< 1	177.03
CMI-7000S membrane	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	nd ^[a]	79.17

[a] Not determined.

Tabela 2. Skład chemiczny zastosowanych materiałów.

Table 2. Chemical composition of ceramic membranes estimated by the stoichiometric ratio of oxygen and other elements.				
Compound	Composition [%]			
	mullite	earthenware	alumina	pyrophyllite
Al ₂ O ₃	59.72	22.00	97.69	32.96
CaO	– ^[a]	2.88	– ^[a]	0.21
Fe ₂ O ₃	1.01	0.75	– ^[a]	– ^[a]
K ₂ O	0.93	1.24	– ^[a]	0.33
MgO	– ^[a]	0.57	– ^[a]	– ^[a]
Na ₂ O	– ^[a]	2.73	– ^[a]	– ^[a]
P ₂ O ₅	– ^[a]	– ^[a]	0.27	0.61
SiO ₂	36.65	67.92	2.02	64.64
SO ₃	– ^[a]	0.84	– ^[a]	– ^[a]
TiO ₂	0.97	0.94	– ^[a]	0.96

[a] Not detected or below the detection limit.

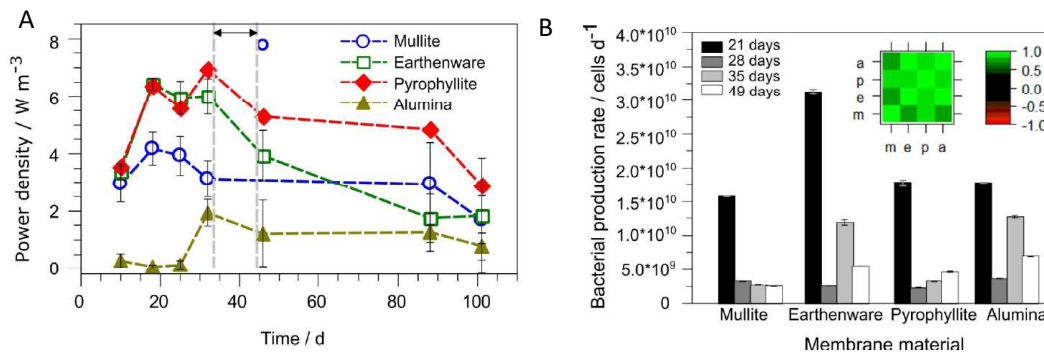
**Figure S1.** Schematic representation of MFC design. Bold arrows represent inlet and outlet.**Rysunek 2.** Budowa miniaturowego ogniwa MFC do celów analitycznych (H1).

Aby obniżyć kosztocłonność technologii MFC, w swojej pierwszej pracy (H1) zastosowałem materiały dostępne bezpośrednio na brytyjskim rynku. Wykorzystałem podejście, w którym materiał ceramiczny nie tylko spełnia rolę separatora, ale także materiał budulcowy całego ogniwa, co dodatkowo obniża koszty jego wytworzenia. Celem pracy było poszerzenie obowiązującego stanu wiedzy na temat możliwości wykorzystania materiałów ceramicznych w ogniwach MFC poprzez badania wpływu charakterystyki tych materiałów na ich zachowanie oraz efektywność w dłuższym okresie czasu, w warunkach reaktorów o przepływie ciągłym. Do badań wybrałem dwa niskokosztowe materiały z grupy glinokrzemianów: earthenware (otrzymany z gliny wypalającej się na biało) oraz mullite (mullit, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) oraz materiały, których dotychczas nie wykorzystywano: alumina (tlenek glinu) oraz pyrophyllite (pirofyllit, zasadowy krzemian glinu, $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$). Wszystkie materiały miały cylindryczną budowę i zostały dobrane spośród dostępnych na rynku materiałów. Geometria każdego materiału została dostosowana w taki sposób, aby każde ogniwo posiadało tę samą objętość roboczą (11,4 mL). Zmierzoną charakterystykę wykorzystanych materiałów przedstawiłem na poniższych tabelach (Tabela 1 oraz Tabela 2):

W celu przeprowadzenia eksperymentu opracowałem nowy rodzaj ogniwa, z przegrodą zwiększającą powierzchnię kontaktu anody z paliwem (Rysunek 2). Ogniwo zasilane było ludzkim moczem z mieszanej populacji, zbieranym oraz zanonimizowanym w miejscu badań.

Przebieg procesu konwersji moczu do prądu w badanych ogniwach testowany był w długim, jak na standardy obecnej oraz ówczesnej literatury okresie czasu. Wykazałem, że materiały które cechowała najwyższa efektywność (w przedziale 6-7 W/m^3 – Tabela 1 oraz Rysunek 3A): earthenware oraz pirofyllit, pomimo różnej porowatości cechowały się zbliżoną zawartością krzemu (Tabela 1).

W toku przeprowadzonych badań wykazałem, że właściwości materiałów ceramicznych są kluczowe nie tylko dla osiąganych parametrów elektrochemicznych warunkujących efektywność ogniwa takich jak rezystancja elementów budulcowych (abiotycznych). Okazało się, że materiał budulcowy, którym jest membrana, ma fundamentalny wpływ wytworzenie w przestrzeni anodowej takiego mikrośrodowiska, w którym mikroorganizmy budują optymalną, zdrową strukturę. Wskazywały na to zarówno redukcje strat napięcia na krzywej polaryzacji: strat aktywacji, strat omowych oraz strat transferu masy, a także zwiększona szybkość podziału biomasy w początkowym, najbardziej kluczowym dla rozruchu momencie wzrostu biofilmu (Rysunek 3B).



Rysunek 3. Maksymalna gęstość prądu (A) oraz szybkość przyrostu biomasy (B) w ogniwach (H1).

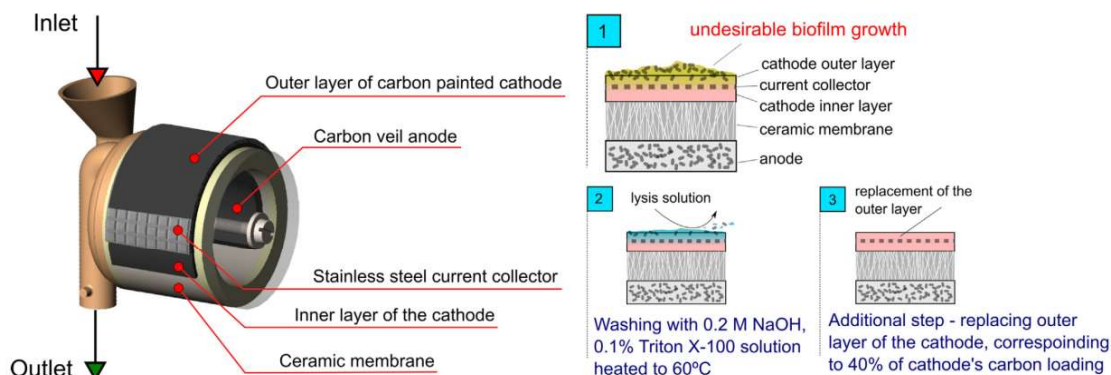
Badania te umożliwiły określenie najbardziej efektywnego kosztowo materiału do zastosowania w ogniwie powietrzno-katodowym. Materiałem tym był earthenware, którego koszt oszacowany został po cenach detalicznych jako 4,14 GBP/m² co daje niemal 20-krotnie niższą wartość od stosowanych dotychczas komercyjnych membran (Tabela 1), przy zachowaniu wyższej sprawności (Winfield et al., 2013a). Wgląd w charakterystykę materiałów ceramicznych oraz jej wpływ na pracę ogniwa był przedmiotem dalszych badań, które wykonywałem w grupie prof. Martina Hanczyca w University of Trento, przy współpracy z grupą prof. Ieropoulosa (You et al., 2019).

Przeprowadzenie długoterminowych eksperymentów w pracy H1 pozwoliło również na zidentyfikowanie problemu spadku wydajności prądowej w długim okresie. Obserwacje powierzchni katody powietrznej, scalonej z membraną pozwoliły na sformułowanie hipotezy, że spadek ten może mieć związek ze zjawiskiem biofoulingu membran oraz katod, przy zastosowaniu porowatych membran.

Zjawisko biofoulingu membran oraz separatorów w BES (w tym szczególnie w MFC), a także strategii zapobiegania temu zjawisku opisałem szczegółowo w najnowszej pracy, która powstała ze znacznym udziałem doktorantów, dla których sprawuję funkcję promotora pomocniczego oraz we współpracy z zespołem z Bristolu (Pasternak et al., 2022). W artykule tym przytaczamy między innymi pracę, która powstała jako bezpośrednia konsekwencja wspomnianej powyżej obserwacji (H2) oraz kolejną publikację na podstawie badań, przeprowadzonych już na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej (H3).

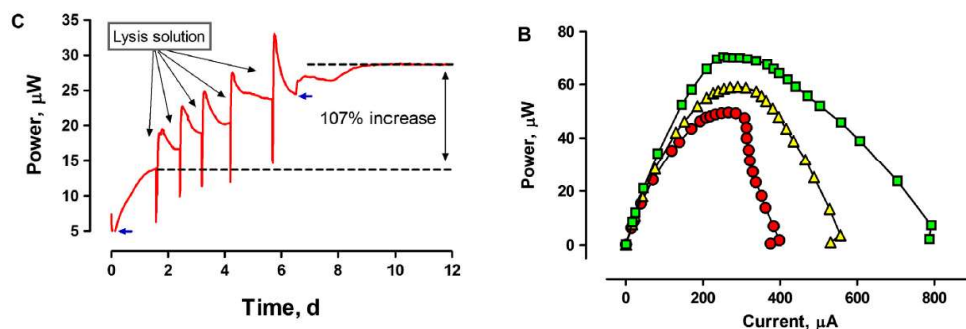
Pomimo iż wybrany do dalszych badań materiał charakteryzował się najwyższą wydajnością prądową oraz efektywnością kosztową, jego wykorzystanie w połączeniu z grafitowo-polimerową

katodą powietrzną skutkowało obniżeniem, a w skrajnym przypadku całkowitą deterioracją dostarczania prądu przez ogniwo. Aby wykluczyć potencjalną możliwość nadmiernej akumulacji materiału biologicznego w przestrzeni anodowej, zmieniłem warunki hydrodynamiczne panujące w układzie poprzez usunięcie przegrody w przestrzeni anodowej oraz geometrię i położenie wlotu oraz wylotu paliwa (H2, Rysunek 4, poniżej).



Rysunek 4. Schemat ogniwa oraz metody regeneracji układu membrana-katoda (H2).

Po wykluczeniu możliwości spadku efektywności ogniwa w wyniku zjawisk zachodzących w przestrzeni anodowej oraz przeprowadzeniu eksperymentów polaryzacji, które wskazywały na spadek napięcia w rejonie strat transferu masy, opracowałem metodę regeneracji układu membrana - katoda. Wcześniejsze, znane w literaturze próby (wykorzystanie HCl przez 1 godzinę) okazały się nieskuteczne (Chung et al., 2011). Zaproponowana przeze mnie metoda czerpała ze znanej w biologii molekularnej metody lizy alkalicznej w celu ekstrakcji i izolacji kwasów nukleinowych oraz białek. Wykorzystanie 0.2 M NaOH okazało się nieskuteczne, jednak z dodatkiem surfaktantu (0.1 % Triton X-100), w temperaturze podniesionej do 60°C (Rysunek 4), uzyskałem natychmiastowy, trwały efekt regeneracji efektywności ogniwa. Powtórzenie procesu lub uzupełnienie go o częściową wymianę zewnętrznej powłoki katody doprowadziło do całkowitej regeneracji (Rysunek 5). Badania przeprowadzone metodami cytometrii przepływowej z wykorzystaniem barwienia martwych i żywych komórek, a także elektronowa mikroskopia skaningowa dodatkowo potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody w usuwaniu filmu z powierzchni układu membrana - katoda.



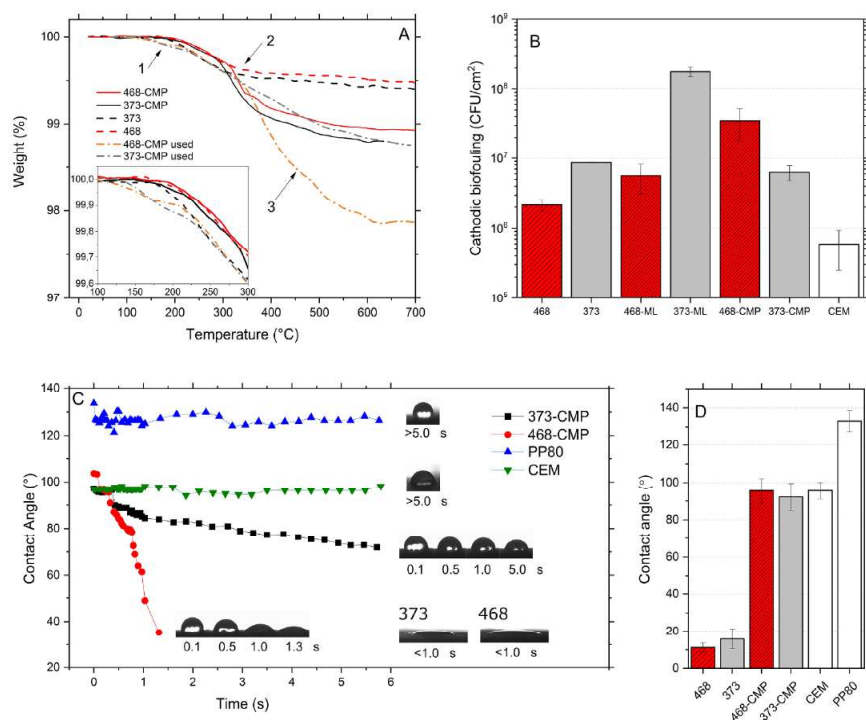
Rysunek 5. Wpływ regeneracji katod na moc w czasie rzeczywistym (A) oraz krzywe polaryzacji (B) (H2).

Zaproponowana przeze mnie metoda była w czasie jej publikacji najskuteczniejszą metodą usuwania biofilmu z powierzchni układu membrana - katoda oraz wielokrotnie cytowana. Ponadto, ten sam układ (czyszczenie w układzie NaOH/Triton-X100) zastosowano niedawno dla szeroko wykorzystywanych membran filtracyjnych z nanowłóknien polimerowych. Charakteryzował się on najwyższą skutecznością wśród badanych rozwiązań (Gul et al., 2022), co poszerza wpływ pracy na rozwój układów membranowych w szerszym kontekście.

Inny sposób podejścia do zagadnienia biofoulingu w układach ceramicznych z katodą powietrzną zaprezentowałem w jednej z nowszych prac (**H3**). Przytoczona praca powstała już w okresie w którym zdobyłem finansowanie na powrót do Polski w ramach projektu „Polskie Powroty”, Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej oraz projektu OPUS „Mechanizmy bioelektrochemicznej transformacji materiałów odpadowych z przemysłu naftowego do biosurfaktantów”, Narodowego Centrum Nauki. W obu tych projektach pełniłem lub pełnię (OPUS) rolę kierownika projektu.

Zastosowana przeze mnie w pracy **H3** hipoteza zakładała wydłużenie żywotności membran ceramicznych poprzez utrudnienie mikroorganizmom asocjacji z powierzchnią porowatej, ceramicznej membrany od strony komory katodowej. Wykorzystałem tutaj dwie strategie, spełniające 2 z 3 założeń zasady 3R (reduce, reuse, recycle). Materiał, który posłużył do modyfikacji musiał się charakteryzować, podobnie jak niemodyfikowane materiały, niskim kosztem wytworzenia dlatego do modyfikacji układu posłużył polipropylen (włóknina PP80). Jest on jednym z najtańszych recyklingowanych materiałów na świecie. Pierwsza strategia obejmowała ponowne wykorzystanie niemodyfikowanego polipropylenu jako dodatkowej, luźno ułożonej warstwy oddzielającej membranę ceramiczną od anody. Drugie podejście polegało na od wytworzeniu nowego materiału kompozytowego, w którym PP80 został przetworzony termicznie i chemicznie oraz naniesiony w postaci cienkiego filmu na powierzchnię ceramiczną jako warstwa zabezpieczająca przed adhezją oraz dalszym przenikaniem biofilmu w głąb membrany oraz dalej - do katody.

W toku przeprowadzonych badań opracowałem metody pozyskiwania nowych typów membran ceramicznych oraz zidentyfikowałem strategię, która przyniosła najbardziej pożądany rezultat – a więc wydłużenie żywotności membran, w testowanym okresie trzech miesięcy. Umieszczenie PP80 jako dodatkowego separatora okazało się nieskuteczne, materiał ten o włóknistej strukturze okazał się być dobrym podłożem do transferu biofilmu w kontakcie z powierzchnią anody. Modyfikacja dwóch typów ceramiki (373 oraz 468) z wykorzystaniem podejścia recyklingu okazała się być skuteczna tylko w przypadku materiału 373. Naniesiona warstwa polimeru w obu przypadkach wpływała na hydrofobowość powierzchni. W warunkach pomiarów statycznych te dwa materiały charakteryzowały się zbliżoną wartością współczynnika kąta zwilżania (Rysunek 6), jednak ich zachowanie w warunkach pomiarów dynamicznych znacznie się różniło. Zmodyfikowany materiał (373-CMP) charakteryzowała dużo wyższa stabilność. Różnice te, w połączeniu z wyjściową oraz końcową morfologią materiałów obserwowaną z wykorzystaniem SEM wpłynęły na parametry elektrochemiczne ogniw oraz ich podatność na zjawisko biofoulingu.



Rysunek 6. Właściwości otrzymanych i testowanych membran (H3).

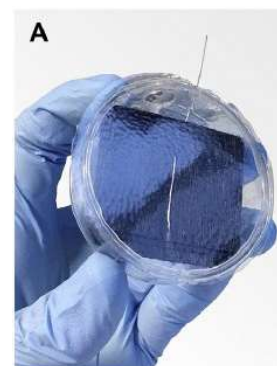
Zastosowana strategia w przypadku tego materiału (373-CMP) skutkowałą w długim okresie 600 % wzrostem wydajności prądowej oraz 92 % wzrostem w odniesieniu do wartości maksymalnych, najniższej całkowitej impedancji ogniwa oraz najniższej impedancji układu membrana - elektrolit (35 Ω), znacznym ograniczeniem nadpotencjału katody oraz ilości biofilmu obserwowanego metodami mikroskopii SEM. Ponadto, wykorzystując metody TGA oraz posiewy mikrobiologiczne udało się powiązać zjawisko biofoulingu na zewnętrznej części układu (katoda) z biofoulingiem obserwowanym zarówno na powierzchni jak i wewnątrz membrany ceramicznej (Rysunek 6). W toku przeprowadzonych badań wykazałem, że możliwe jest wykorzystanie recyklingowanych polimerów w celu wydłużenia żywotności oraz efektywności nisko kosztowych membran ceramicznych w układach MFC oraz określiłem pożądane cechy materiałów, aby taka strategia mogła zostać wykorzystana. Praca ta, powstała jako pierwsza praca badawcza po utworzeniu przeze mnie Laboratorium Mikrobiologicznych Układów Elektrochemicznych, została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie Chemical Engineering Journal.

4.3.2. Ogniwa oparte na materiałach polimerowych

Materiały ceramiczne, pomimo ich licznych zalet mają również swoje ograniczenia, poza obserwowanym w pracach H1-H3 zjawiskiem biofoulingu charakteryzuje je również znaczny ciężar oraz ograniczenia związane z geometrią. W niektórych, specyficznych typach MFC pożądana jest transmisja światła w zakresie UV/Vis. Tego typu BES wykorzystują algi, których obecność w komorze katody może powodować podniesienie jej (katody) sprawności poprzez dostarczanie czynnika utleniającego. Algi wytwarzają tlen w wyniku fotolizy wody, reakcji zachodzącej w procesie fotosyntezy. Natomiast obecność alg w komorze katody oraz liza obumarłych komórek może

dostarczać odnawialnego paliwa, syntezowanego *in-situ*. Obszar możliwych zastosowań przepuszczających światło układów można rozszerzyć o wszelkie reakcje fotokatalityczne, np. w celu usuwania zanieczyszczeń lub konstrukcji opartych na MFC sensorów (Tong et al., 2022).

Tematykę przepuszczających światło membran podjąłem podczas ponad dwuletniego stażu w University of Trento, gdzie zatrudniony byłem w ramach projektu H2020 „LIAR – Living Architecture”. Kierownikiem zadania badawczego (Work Package) w University of Trento był prof. Martin Hanczyc. W ramach zatrudnienia w Trento, koordynowałem pracę studentów realizujących staże oraz prace dyplomowe. Zaproponowałem wykorzystanie gotowych mikroplitek z polistyrenu jako przezroczystej obudowy do wysokoprzepustowych badań MFC w układzie z algami. Koncepcję tą uzupełniliśmy o wykorzystanie transparentnego materiału z fibroiny jedwabiu, we współpracy z grupą prof. Antonella Motta. W ramach zaplanowanych przeze mnie eksperymentów opracowaliśmy metodę syntezy oraz zastosowań membran na potrzeby układów MFC, czego efektem było powstanie trzech typów membran. Opracowałem również ogniwa o prostej konstrukcji z przezroczystego polistyrenu. Membrany charakteryzowały się bardzo wysoką transmitancją (powyżej 90 % w zakresie światła widzialnego). Przygotowane zostały membrany o trzech różnych stężeniach fibroiny (2, 4 i 8 %). Najlepsze właściwości wykazywała membrana o 2 % stężeniu fibroiny, uzyskując około 70 % mocy obserwowanej dla komercyjnej membrany kationowymiennej jako kontroli. Po zakończeniu testów w MFC, membrana ta charakteryzowała się również najlepszymi parametrami transmitancji w zakresach światła odpowiedzialnych za fotosyntezę. Membrany 2 % pomimo swej niewielkiej grubości - około 50 μm , a więc 10-11 mniejszej niż w przypadku membrany kationowymiennej, charakteryzowały się zatem pożądanymi parametrami. Obecność fibroiny i niewielka grubość wytworzonych membran doprowadziła jednak do ich fizycznej i biologicznej deterioracji już po 4 tygodniach. Możliwe zastosowania tego typu membran obejmują specjalne typy ogniwa, które mogłyby ulegać całkowitej biodegradacji w środowisku, po wykonaniu określonego zadania, lub rozwiązania w których wymagane są biokompatybilne materiały (np. ogniwa wykorzystujące pot człowieka jako paliwo).



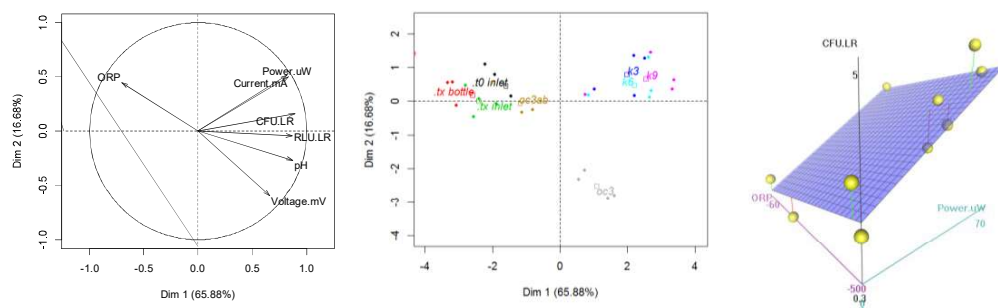
Rysunek 7. Transparentna membrana z fibroiny jedwabiu (H4).

4.4. Elektrolit MFC jako czynnik bakteriobójczy i wirusobójczy

Technologia MFC rozwijana jest w znacznym stopniu w kierunku oczyszczania ścieków. W szczególności, wykorzystywana może być w miejscach nie objętych zarówno dostępem do sieci elektrycznej jak i dostępem do kanalizacji. Każdy układ technologiczny, przeznaczony do konwersji lub oczyszczania odpadów pochodzenia biologicznego powinien charakteryzować się odpowiednio wysokim stopniem usuwania mikroorganizmów chorobotwórczych. Podobnie technologia MFC, aby zminimalizować ryzyko zakażeń podczas procesu oczyszczania ścieków powinna charakteryzować się wysokim stopniem redukcji. Zagadnienie to było przedmiotem moich badań, przedstawionych w publikacjach **H5-H8**. We wszystkich pracach paliwem był mieszany ludzki moc.

Po doborze najbardziej odpowiednich membran oraz konstrukcji MFC opisanych w części 4.3., opracowałem układ do badania zachowania patogenów w ogniwach. Układ składał się z kaskady reaktorów typu MFC, o przepływie ciągłym. Każdy kolejny reaktor w kaskadzie wydłużał czas przetrzymania cząstek a więc czas ekspozycji czynników chorobotwórczych w układzie. Kaskada wyposażona została w układ detekcji fotonów, dzięki któremu mogłem monitorować aktywność bakterii patogennych w czasie rzeczywistym. W tym celu wykorzystałem mikroorganizmy zmodyfikowane genetycznie (wyposażone w pochodną plazmidu pBBR1MCS-2 zawierające operon luxCDABE z *Photorhabdus luminescens*), pochodzące z kolekcji University of the West of England. Praca **H5** była pierwszą dostępną pracą, w której badano redukcję liczby patogenów w komorze anodowej, czyli zasadniczej komorze, w której dochodzi do oczyszczania ścieków i produkcji prądu. W pracy tej wykorzystałem *Salmonella enteritidis*, jako modelowy gatunek wskaźnikowy.

Opracowany w pracy **H5** układ badawczy wykorzystałem również w pracy **H6**, w której badałem stopień redukcji elementów funkcjonalnych wirusa żółtaczkowego typu B (Hep B, HBV). W pracy zastosowałem antygen powierzchniowy (otoczkowy, HBsAg) oraz rdzeniowy (HBcAg), które są najważniejszymi elementami budulcowymi wirusa. W pracy **H7**, będącej kontynuacją badań, wykorzystaliśmy zarówno wspomniany układ badawczy jak i jego odwzorowanie, w którym zastosowaliśmy większe reaktory, z katodą zapewniającą wyższy poziom mocy MFC. Przedmiotem badań były szczepy *S. Typhimurium*, *S. Aureus* oraz *P. aeruginosa*. Prace **H5-H7** obejmowały wykorzystanie powstającego w procesie aniolitu jako czynnika bakterio- i wiruso-bójczego. Praca **H8** natomiast, dotyczyła wykorzystania katiolitu, który syntezowany jest w warunkach pracy ogniwa, w wyniku transportu jonów przez membranę oraz procesów redukcji elektrochemicznej. Mikroorganizmy objęte testami obejmowały *E. coli* oraz badania całej populacji metodą cytometrii przepływowej. W pracy tej wykorzystaliśmy ogniwa, które w dalszej kolejności stanowiły podstawę do budowy przez mnie oraz pozostałych członków grupy stosu MFC w skali pilotowej. Badania te opisane zostały w pracy z poza cyklu (**Gajda et al., 2018**).



Rysunek 8. Wyniki analizy statystycznej, ukazującej zależność parametrów mocy ogniwa i warunków redoks aniolitu od stopnia redukcji mikroorganizmów chorobotwórczych.

W wyniku badań, które przeprowadziłem w ramach pracy **H5** ustaliłem parametry pracy ogniwa, dla których stopień redukcji aktywności metabolicznej oraz przeżywalności *S. typhimurium* znacznie przewyższa obserwowane w klasycznych układach oczyszczania ścieków wartości. Dla

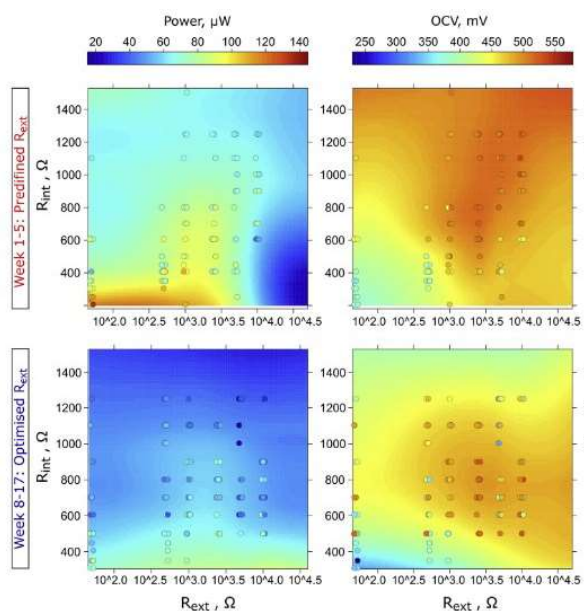
konwencjonalnego układu oczyszczania ścieków na końcu całego układu stopień redukcji (LR) wynosi 1,5 dla *E. Coli* (Oakley and Mihelcic, 2019), podczas gdy wartości osiągnięte na końcu kaskady MFC osiągały LR=4,4. Podobnie badania luminescencji wykazały natychmiastowy spadek aktywności metabolizmu patogenów do poziomu LR=4,2. Dwa niezależne testy pozwoliły mi na sformułowanie hipotezy, że powstające w komorze anodowej warunki redoks są uzależnione mocy MFC. Zatem moc ogniwa jest parametrem, który determinuje jego skuteczność redukcji mikroorganizmów patogennych. Hipotezę tą zweryfikowałem dodatkowo poprzez analizę korelacji parametrów elektrochemicznych ale także zastosowanie analizy głównych składowych i zestawienie mocy ogniwa, warunków redoks w reaktorze oraz liczby patogenów (**Rysunek 8**). Praca **H5** była pierwszą pracą, w której wykazano tę zależność. Badany szczep *S. typhimurium* nie uległ również adhezji oraz namnażaniu na powierzchni elektrod układu. Na ich powierzchni nie wykryto ani jednej komórki tworzącej kolonie.

W przypadku pracy **H6**, największy wpływ parametrów elektrochemicznych ogniwa na skuteczność redukcji wykazałem w przypadku antygenu rdzenia (HBcAg). Antygen powierzchniowy usuwany był w równym stopniu w ogniwach kontrolnych, działających w trybie obwodu otwartego. Również w tym wypadku stopień redukcji (dla HBcAg) był uzależniony od mocy ogniwa oraz potencjału redoks. Praca H6 była pierwszą pracą, w której podjęto tematykę przeżywalności wirusów w układach typu MFC. Eksperymenty przeprowadzone w ramach pracy **H7** potwierdziły wcześniejsze obserwacje na szerszej grupie mikroorganizmów patogennych, osiągając jeszcze wyższe współczynniki redukcji do poziomu LR=7,8. W pracy **H8**, wraz z zespołem badaliśmy wpływ grubości membrany ceramicznej na parametry determinujące redukcję mikroorganizmów w komorze katodowej. Elektrolit o wysokiej skuteczności nie tylko zapobiega rozwojowi mikroorganizmów w komorze, ale także może zostać wykorzystany w kolejnym procesie w celu dezynfekcji. Wraz ze wzrostem grubości membrany (zakres 2,5; 5 oraz 10 mm) wzrastała selektywność membran względem transferu naładowanych dodatnio jonów z aniolitu do katiolitu (NH_4^+ , Na^+ , K^+), podobnie jak pH oraz wyznaczona zawartość jonów O_2H^- powstających w reakcji redukcji tlenu (ORR).

Przytoczone wyżej publikacje stanowią dowód, że technologia mikrobiologicznych ogniwa paliwowych nie tylko nie przyczynia się do namnażania patogenów w układzie, ale są one eliminowane z bardzo wysoką skutecznością. Skuteczność ta przewyższa o kilka rzędów skuteczność notowaną w konwencjonalnych układach oczyszczania ścieków, co czyni technologię MFC bezpieczną w kontekście zdrowia publicznego.

4.5. Rezystancja zewnętrzna jako kluczowy czynnik rozruchu ogniwa

Jak wykazały badania wpływu aktywności elektroaktywnego biofilmu na redukcję organizmów patogennych, dojrzały biofilm posiada bardzo stabilną strukturę. Jest to cecha charakterystyczna również dla innych rodzajów biofilmów. Tym bardziej kluczowy jest wstępny okres rozruchu pracy ogniwa – dochodzi w nim do przyrostu oraz kształtowania się składu i struktury (architektury) biokatalizatora. Biofilm oraz jego interakcje z elektrodą, to kolejny kluczowy element funkcjonalny układów bioelektrochemicznych. Zagadnienie to, było przedmiotem mojej kolejnej pracy (**H9**), zrealizowanej podczas pracy w Wielkiej Brytanii.



Rysunek 9. Jednoczesny wpływ R_{ext} oraz R_{int} na rozwój podstawowych parametrów elektrochemicznych MFC podczas dwóch faz okresu eksperymentalnego (H9).

Parametry takie jak napięcie obwodu otwartego (OCV), R_{int} , moc ogniwa, natężenie prądu, były monitorowane podczas całego okresu eksperymentalnego. Struktura i architektura biofilmu były analizowane po zakończeniu badań. Dojrzewanie biofilmu z wykorzystaniem zróżnicowanych wartości R_{ext} spowodowało szereg zmian w jego zachowaniu. Wykazałem, że adaptacja przyrost biofilmu w warunkach wyższej niż optymalna wartości prowadziła do obniżenia sprawności ogniwa. Zastosowanie niższej niż optymalna wartości miało pozytywny wpływ na rozwinięty podczas przyrostu parametr R_{int} oraz moc ogniwa. Jak wykazała analiza statystyczna, największe zmiany w dynamice rozwoju wszystkich parametrów elektrochemicznych MFC obserwowano podczas pierwszych 5 tygodni przyrostu biofilmu. Najciekawszym spostrzeżeniem w opublikowanej części badań jest fakt, że zmiana strategii w drugiej fazie oraz zastosowanie symulowanej procedury MPPT (dynamiczna zmiana R_{ext}), nie doprowadziła do zmiany zaobserwowanych profili elektrochemicznych (Rysunek 9). Podczas rozruchu ogniwa doszło do wzrostu biofilmu o trwałej architekturze oraz właściwościach elektrochemicznych, co obrazuje zarówno przedstawiony na wykresie model regresji, przedstawiona w pracy korelacja parametrów elektrochemicznych, a także analiza z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej oraz spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją energii. Analiza morfologii i topografii biofilmu oraz jego składu pierwiastkowego wykazała wzrost ilości wytrąconych kryształów (zbudowanych głównie z Na, Cl, Mg, P, Ca) oraz polimerów zewnątrzkomórkowych (EPS), wraz ze wzrostem R_{ext} . Ponadto zaobserwowano różnicę w strukturze kanałów doprowadzając paliwo (substrat) do wnętrza biofilmu oraz gęstości mikroorganizmów, która rosła wraz ze spadkiem R_{ext} .

Na etapie tworzenia pracy, nie było jasne w jaki sposób rezystancja zewnętrzna (R_{ext}) ogniwa wpływa na dynamikę wzrostu biokatalizatora na powierzchni anody. Celem badań było określenie wpływu R_{ext} na krótko- i długoterminowe zachowanie biofilmu oraz jego parametrów elektrochemicznych i biologicznych poprzez ustalenie stałego oraz kontrolowanego dynamicznie poziomu rezystancji. Do realizacji pracy wykorzystałem ogniwa opracowane na wcześniejszym etapie (H1, H2, H5, H6) oraz opracowałem stanowisko pomiarowe składające się z macierzy 21 ogniw, z których każde działało jako niezależny reaktor o przepływie ciągłym, zasilany moczem. W pierwszym etapie, MFC były podłączone z wykorzystaniem

Powyższe obserwacje pozwoliły mi wyjaśnić wpływ R_{ext} na dynamiczny rozwój parametru R_{int} , który jest kluczowy dla osiągnięcia pozostałych pożądaných parametrów ogniwa takich jak moc oraz natężenie prądu. Przedstawione w pracy **H9** badania stanowią wytyczne dla rozruchu pracy ogniwa, który przeprowadzony w sposób niewłaściwy może determinować długofalowe problemy w funkcjonowaniu instalacji opartych na MFC oraz innych typach BES.

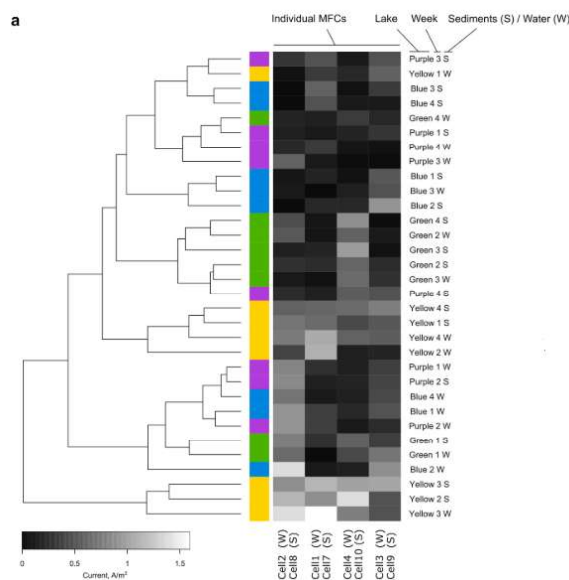
4.6. Zastosowania układów opartych na MFC

Nadrzędnym celem rozwoju technologii MFC jest jej wykorzystanie w praktyce. Udoskonalanie materiałów, konstrukcji, mechanizmów kontroli oraz optymalizacja procesów pozwala na podniesienie efektywności ogniw zarówno w kontekście uzyskiwanej mocy, jak i efektywności usuwania substratu lub związków biogennych. Na obecnym etapie rozwoju technologii MFC, uzyskiwane ilości prądu pozwalają nie tylko na oczyszczanie ścieków ale także na praktyczne wykorzystanie prądu lub sygnału generowanego przez ogniwo. Układy, które były przeze mnie rozwijane zarówno w ramach prac które prowadziłem jako kierownik zespołu (**H10**) jak i podczas pracy w grupie badawczej w Bristol BioEnergy Centre (**H11** i **H12**) stanowią przykłady przyszłych zastosowań MFC w praktyce.

4.6.1. Wysokoprzepustowa platforma MFC do badań mikroorganizmów

W okresie mojego zatrudnienia na Wydziale Chemicznym PWR podjąłem współpracę z zespołem Prof. Igora Goryanina z Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), oraz Brno University of Technology. Podpisana pomiędzy instytucjami z Japonii oraz Polski umowa na badania celowe, finansowana przez stronę Japońską obejmowała m.in. 3-miesięczny staż badawczy Dr. Łukasza Szydłowskiego w mojej grupie. W ramach podjętej współpracy udoskonaliliśmy i wykorzystaliśmy układ do badań wysokoprzepustowych (**H10**). Układ ten powstał z myślą o potrzebach badawczych społeczności badawczo-rozwojowej jako platforma, która umożliwia testowanie w formie płytki 96-dółkowej konsorcjów mikroorganizmów elektroaktywnych i ich poszukiwania, zarówno w postaci czystych szczepów jak i konsorcjów, mikroorganizmów modyfikowanych genetycznie, optymalizacji oraz skringingu substratów wykorzystywanych w procesach, a także materiałów elektrodowych oraz membran.

Układ składał się z 96 niezależnie działających MFC w skali mikrolitrowej, które dodatkowo można było wyposażyć w



Rysunek 10. Wyniki grupowania hierarchicznego obrazujące zachowanie konsorcjów w poszczególnych ogniwach. Wyniki wskazują na możliwość różnicowania biofilmu na podstawie parametrów elektrochemicznych..

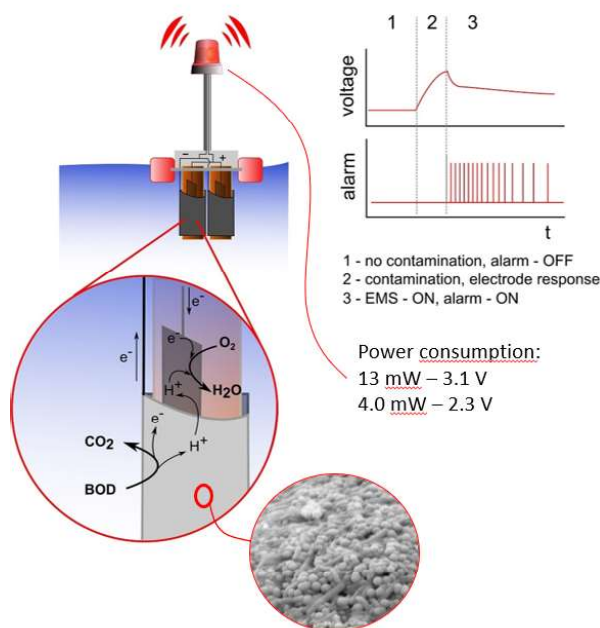
elektrodę referencyjną. 96-dółkowa komora anodowa była wyposażona w płytkę PCB, pokrytą cienkowarstwową miedzią, zabezpieczoną warstwą złota. Komorę anody wyposażyłem w krążki z tkaniny węglowej, które w dalszej kolejności wykorzystaliśmy jako zaszczepy najlepszych konsorcjów dla większych, analitycznych MFC, w układzie dwukomorowym.

Układ 96-BES został wykorzystany do skringu próbek środowiskowych w celu poszukiwania mikroorganizmów elektroaktywnych oraz możliwości ich wykorzystania do redukcji Cu^{2+} . W tym celu wytypowałem obszar województwa dolnośląskiego obejmujący wygaszone kopalnie pirytu, których wyrobiska zostały zalane, znany jako „Kolorowe Jezioro”. Obszar ten leży na terenie historycznie bogatym w pokłady miedzi, skład fizyko-chemiczny każdego ze zbiorników różni się co determinuje jego barwę. Po wykonaniu podstawowych pomiarów fizykochemicznych w miejscu poboru oraz poborze próbek wody powierzchniowej oraz osadów dalsze badania prowadzone były w warunkach laboratoryjnych. Zarówno w osadzie jak i w próbkach wody, najwyższą zawartość Cu zaobserwowano w zbiorniku żółtym („Żółte Jezioro”). Platforma 96-BES, po zaszczepieniu utrzymywana była w warunkach okresowych oraz monitorowana przez dwa tygodnie. Przeprowadzone testy umożliwiły selekcję konsorcjów, które wykazywały najwyższy współczynnik gęstości mocy oraz walidację możliwości ich wykorzystania w większej skali, czyli transfer ze skali mikro- do mililitrowej. Paliwo wykorzystane w większych MFC zostało wzbogacone jonami Cu^{2+} . Ponadto, przeprowadzenie wysokoprzepustowych oraz analiza statystyczna pozwoliły mi na sformułowanie kolejnego (po pracy **H9**) dowodu na możliwość profilowania mikroorganizmów z wykorzystaniem metod elektrochemicznych. Jak wykazała analiza EDS, wyselekcjonowane konsorcja elektroaktywne wchodziły w interakcję z miedzią z roztworu, którą zaobserwowano zarówno na powierzchni biofilmu jak i anod, również w postaci tzw. nanokwiatów $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$. Przeprowadzona analiza metagenomiczna wykazała występowanie szczepów z rodzin *Pseudomonadaceae* i *Xanthomonadaceae*, które obejmują znane z literatury przykłady odpowiedzialne ze redukcję miedzi. Analizę wyników podsumowałem z wykorzystaniem analizy PCA, która wykazała że zbiornik niebieski był najbardziej zbliżony swoimi parametrami fizykochemicznymi (ORP, przewodność, pH, Cu) do zbiornika zielonego; podobnie żółty do purpurowego, w odniesieniu do osadu oraz wody osobno. Badania z wykorzystaniem układu do wysokoprzepustowych badań pozwoliły wykazać zatem, że próbki środowiskowe, które cechowała najniższa wartość pH oraz najwyższe parametry ORP i przewodności były najlepszym źródłem do pozyskania najbardziej aktywnych biokatalizatorów. Szczepy te posiadają unikatowe zdolności utrzymania aktywności metabolicznej przy wysokim stężeniu metali ciężkich oraz niskim pH co może mieć zastosowanie w procesach biohydrometalurgicznych wspomaganych układami bioelektrochemicznymi. Opracowana i przetestowana platforma skringowa z powodzeniem stosowana może być do selekcji, namnażania oraz inokulacji większych ogniów, w celu krokowego zwiększania skali.

4.6.2. Autonomiczny, samozasilający się biosensor jakości wody powierzchniowej

Stale pogarszający się stan jakości wód powierzchniowych wymusza potrzebę bardziej efektywnego monitoringu zanieczyszczeń organicznych. Potrzebę tą tylko wzmocniły niedawne doniesienia dotyczące katastrofy ekologicznej w Odrze oraz trudności w identyfikacji zanieczyszczeń

(PAP, 2022). Klasyczne metody oceny detekcji materii organicznej, w dużej mierze opierają się na ocenie biologicznego zapotrzebowania tlenu (BZT). Ocena BZT wymaga kilkudniowej inkubacji próbek. Metody te zastąpione mogą być poprzez wykorzystanie biosensorów. Jednym z możliwych rozwiązań jest analiza sygnału elektrycznego generowanego przez bakterie w czasie rzeczywistym. Niemniej jednak rozwiązanie takie wymaga wykorzystania urządzeń peryferyjnych w celu interpretacji sygnału.



Rysunek 11. Autonomiczny, samozasilający się biosensor jakości wody (H11).

układu opartego na bakterii produkujących prąd, z elektronicznym systemem tworzy zatem symbiotyczne połączenie między nimi: żywy układ jest wykorzystywany jako element sensoryczny, który jednocześnie dostarcza prąd elektryczny w celu utrzymania aktywności układu elektronicznego, podczas gdy układ elektroniczny podtrzymuje aktywność właściwości elektroaktywnych bakterii oraz uruchamia sygnał alarmowy. Biosensor wykazał się długim czasem działania w warunkach autonomicznych, bez konieczności ingerencji przez okres roku. Częstotliwość sygnału uwarunkowana była od stężenia zanieczyszczeń zarówno prostych, jak i ścieków bytowo-gospodarczych. Unoszący się na powierzchni wody samowystarczalny biosensor jest pierwszym tego typu rozwiązaniem na świecie, korzystającym z praktycznych możliwości wykorzystania mikrobiologicznych ogniw paliwowych.

Monitoring środowiskowy jest niezbędny w celu reagowania oraz przeciwdziałania zanieczyszczeniom w środowisku. Wykorzystanie biosensora wykracza poza wykwalifikowane laboratoria. Znaleźć może on zastosowanie w odległych regionach, pozbawionych dostępu do sieci elektrycznej lub innych źródeł prądu. Mechanizm, dzięki któremu alarm emitowany przez biosensor jest uzależniony od stężenia zanieczyszczeń czyni jego użytkowanie oraz interpretację bardzo

W pracy **H11**, zaproponowałem koncepcję biosensora opartego na układzie czterech ogniw MFC połączonych w stos. Jego zasadę działania przedstawiłem na Rysunku 10. Praca przedstawia pierwszy autonomiczny oraz samowystarczalny biosensor do ciągłego monitoringu wód powierzchniowych. Biosensor ten jest kombinacją dwóch układów: biologicznego oraz elektronicznego. Jest w stanie wygenerować sygnał alarmowy (dźwiękowy oraz wizualny) po przekroczeniu pewnego poziomu zanieczyszczeń. Częstotliwość sygnału jest uzależniona od ilości zanieczyszczeń w wodzie powierzchniowej. Zanieczyszczenia spełniają nie tylko funkcję docelowego analitu, ale także funkcję paliwa zasilającego funkcje biosensora. Kombinacja żywego, oddychającego

intuicyjną, również dla młodych użytkowników oraz użytkowników z niepełnosprawnościami. Autonomiczny, samowystarczalny biosensor otwiera zatem nowy kierunek w natychmiastowej ocenie jakości wody. Nowe generacje tego typu biosensorów, prowadzić mogą do podniesienia jakości życia oraz świadomości środowiskowej. Praca **H11** uzyskała wyróżnienie na największym światowym kongresie biosensorów (Biosensors 2016, ~1500 uczestników) gdzie została przedstawiona w ramach wykładu na zaproszenie oraz zaowocowała zaproszeniem do komitetu przewodniczących.

4.6.3. Instalacja pilotażowa PEE POWER®

Podczas pracy w Bristol BioEnergy Centre, realizowałem prace badawcze w większości wykorzystując mieszany ludzki mocz jako paliwo w MFC. Badania te były szczególnie istotne w kontekście problemów z dostępem do elektryczności oraz kanalizacji w krajach rozwijających się. Ponad 2,5 mld ludzi nie posiada dostępu do systemów odprowadzania i oczyszczania ścieków, podczas gdy około miliarda praktykuje załatwianie swoich potrzeb fizjologicznych na zewnątrz lub w improwizowanych latrynach (WHO and UNICEF, 2017). Stwarza to nie tylko ogromne zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka, ale także bezpośrednio dla środowiska. Szczególną uwagę temu problemowi poświęciła fundacja Billa i Melindy Gates. Fundacja finansowała rozwój innowacyjnych technologii systemów sanitarnych, w tym projektu „Urinetricity ++” w ramach którego realizowałem staż doktorski w latach 2014-2016. Projekt realizowany był poprzez wspólny wysiłek grupy, pod kierownictwem Prof. Ieropoulosa. Jego realizacja obejmowała między innymi aspekty poruszana



Rysunek 12. Badania pilotażowe technologii PEE POWER®, po lewej – testy „Oxfam”, po prawej – testy „Glastonbury” (H12).

przeze mnie w ramach prac **H1**, **H2**, **H5-H9** oraz **H11** oraz pracy nieujętej w cyklu habilitacyjnym, w której opisaliśmy kolejny prototyp technologii PEE POWER® (Gajda et al., 2018).

Praca **H12**, wieńcząca cykl habilitacyjny demonstruje pierwsze wykorzystanie technologii pozyskiwania energii elektrycznej z moczu w instalacji w skali pilotażowej (Rysunek 12). Publikacja opisuje dwa testy instalacji: pierwszy, w którym monitorowano pracę 288 MFC, połączonych w stosy ogniw zainstalowanych na kampusie University of the West of England (Bristol, UK) oraz drugi – w którym przeprowadzono testy instalacji stosu MFC składającej się z 432 MFC na festiwalu muzycznym Glastonbury 2015 (Worthy Farm, Pilton, UK). Pierwszy test przeprowadzony był we współpracy z fundacją charytatywną Oxfam, natomiast drugi we współpracy z firmą Glastonbury Festival Ltd. Obie instalacje wyposażone były w superkondensatory (Oxfam - 4 × 3000 F, Glastonbury – 10 × 3000 F) oraz zmodyfikowane żarówki LED zużywające łącznie 1,2 W (4xLED, Oxfam) oraz 1,8 W (6xLED, Glastonbury). Instalacja „Oxfam” była wyposażona w dwa pisuary, z których korzystać

mogli studenci oraz pracownicy, którzy zgodzili się wziąć udział w badaniach, natomiast instalacja „Glastonbury” w pisuary rynnowe, otwarte dla wszystkich uczestników festiwalu.

Podczas pracy obu układów monitorowane były parametry mocy poszczególnych modułów, całej instalacji, usuwania związków organicznych (ChZT), azotu ogólnego, właściwości katiolitu, natężenia przepływu, pH przewodności oraz parametrów pracy kondensatorów i oświetlenia. Testy instalacji „Oxfam” oraz „Glastonbury” wykazały znaczne różnice w uzyskiwanej mocy oraz efektywności oczyszczania ścieków (moczu). Instalacja w teście „Oxfam” charakteryzowała się niższą mocą (maksymalnie 0,4 W) oraz wyższym stopniem usuwania ChZT. Testy instalacji „Glastonbury” wykazały maksymalną moc na poziomie 0,8 W, równoważną 19.2 W h w ciągu jednej doby oraz niższy stopień usuwania ChZT (w zakresie 15-25 %). Obie instalacje działały w dwóch różnych warunkach hydraulicznych, parametr czasu retencji (HRT) dla „Oxfam” wyniósł 2 – 3 tygodnie, z uwagi na znikoma ilość użytkowników. Podczas testów „Glastonbury”, parametr HRT został określony na poziomie 0,9 d (330 l/d, około 1000 użytkowników/d), co miało zasadniczy wpływ na różnice w efektywności obu układów. Instalacja MFC na festiwalu Glastonbury, była wówczas jedyną toaletą, w której zapewnione było oświetlenie. Zasilane prądem z MFC żarówki włączone były w okresie nocnym, podczas gdy w cyklu dziennym ładowane były kondensatory. Poza naukowymi aspektami związanymi z publikacją pracy, istotnym, społecznym aspektem, w który byłem zaangażowany podczas festiwalu była również edukacja na temat technologii MFC.

Badania te dostarczyły cennych informacji na temat funkcjonowania MFC w warunkach rzeczywistych, przy zmiennej temperaturze oraz ekspozycji na pozostałe czynniki atmosferyczne takie jak nasłonecznienie czy wilgotność oraz zmienne warunki przepływu. W tym samym czasie powstawał kolejny prototyp, który opracowałem wspólnie z dwoma pozostałymi członkami zespołu, charakteryzujący się 3-krotnie wyższym współczynnikiem gęstości prądu (**Gajda et al., 2018**). Powyższe prace ukazują nie tylko możliwość wykorzystania technologii MFC w warunkach polowych, w miejscach pozbawionych dostępu do prądu oraz systemów oczyszczania ścieków, ale także na tempo w jakim technologia ta rozwija się wraz z postępem w badaniach nad funkcjonalnymi komponentami oraz mechanistyką układów bioelektrochemicznych.

4.7. Podsumowanie najważniejszych osiągnięć badawczych

Prace, które zestawiałem jako monotematyczny cykl publikacji obejmowały badania, których celem było poszerzenie istniejącej wiedzy oraz usprawnienie funkcjonowania mikrobiologicznych ogniw paliwowych. Badania te obejmowały funkcjonalne elementy reaktorów bioelektrochemicznych, a więc membranę, anodę, katodę, elektrolit, układ elektryczny, biokatalizator a także aspekty oddziaływań pomiędzy tymi komponentami oraz praktyczne wykorzystanie zjawisk zachodzących w MFC. Opracowane układy charakteryzowały się wysoką skutecznością usuwania czynników patogennych jak bakterie oraz wirusowe białka budulcowe. Ponadto, pozostałe opracowane układy zademonstrowały swoją skuteczność w usuwaniu oraz monitoringu zanieczyszczeń, zasilaniu niskoprądowych urządzeń oraz wysokoprzepustowych badaniach nad nowymi procesami oraz mikroorganizmami w układach bioelektrochemicznych. Badania te, są częścią większej serii publikacji, zarówno prac badawczych jak i przeglądowych, w których poruszane są aspekty wykorzystania

układów bioelektrochemicznych i elektrochemicznych dla osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki obiegu zamkniętego (Ieropoulos et al., 2015; Fowler et al., 2016; Gajda et al., 2018; You et al., 2019; Pasternak et al., 2020b, 2022; Greenman et al., 2021; Pasternak, 2021).

Zestawienie najważniejszych dokonań, zawartych w cyklu habilitacyjnym (H1-H12)

- Badania właściwości oraz metod otrzymywania materiałów membranowych dla MFC, w szczególności materiałów nisko kosztowych (H1, H3, H4).
- Zapoczątkowanie wykorzystania materiałów z recyklingu polimerów w celu poprawy parametrów pracy ogniów (H2).
- Opracowanie metod regeneracji oraz zapobiegania biofoulingowi membran i katod w układach MFC (H2, H3).
- Wykazanie możliwości usuwania patogenów bakteryjnych i wirusowych w ogniach mikrobiologicznych, co ma zasadniczy wpływ na ich praktyczne wykorzystanie (minimalizacja ryzyka sanitarnego), a także wykazanie mechanizmów i parametrów procesu regulujących skuteczność MFC w redukcji patogenów (H5-H8).
- Opracowanie strategii rozruchu i utrzymania instalacji opartych na ogniach mikrobiologicznych oraz wykazanie możliwości kontroli architektury biofilmu produkującego prąd elektryczny poprzez parametry elektrochemiczne układu (H9).
- Dostarczenie dowodów na występowanie elektrochemicznego śladu mikroorganizmów, pozwalającego na ich profilowanie (H9, H10).
- Budowa i wykorzystanie wysokoprzepustowej platformy do badań układów bioelektrochemicznych (H10).
- Demonstracja praktycznego wykorzystania prądu produkowanego w MFC (H11, H12).
- Opracowanie pierwszego, autonomicznego, samo zasilającego się biosensora jakości wody powierzchniowej opartego na MFC, jako system wczesnego ostrzegania (H11).
- Udział w budowie, badaniach oraz rozruchu pierwszej na świecie stacji pilotowej produkującej prąd elektryczny z moczu w celu zasilania oświetlenia latryny poprzez mikrobiologiczne ogniwa paliwowe (H12).

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

Większość prac zestawionych oraz omówionych w ramach monotematycznego cyklu publikacji powstała w wyniku mojej aktywności w dwóch zagranicznych jednostkach badawczych. W niniejszej sekcji omówię jedynie aktywność, która została udokumentowana publikacjami.

Publikacje H1, H2, H5-H9 oraz H11-H12 powstały w wyniku mojej pracy w grupie Bristol BioEnergy Centre, Bristol Robotics Laboratory (BRL), University of the West of England (UK),

kierowanym przez prof. Ioannisa Ieropoulosa. Podczas pracy w BRL powstały również publikacje, które wymienione były przy okazji omawiania cyklu habilitacyjnego, ale nie zostały do niego włączone. Wśród prac, których nie wymieniono znajdują się prace: (**Ieropoulos et al., 2015; Fowler et al., 2016**). W przytoczonym rozdziale książki (**Ieropoulos et al., 2015**) mój wkład obejmował zaproponowanie koncepcji bioreaktora, który zasilany jest energią z MFC, a więc samo zasilającego się autonomicznego reaktora do oczyszczania ścieków, kontynuacją tej koncepcji było zaproponowane przeze mnie urządzenie do detekcji zanieczyszczeń (**H11**). Przytoczona praca w czasopiśmie *Proteomics* była wykonana w ścisłej współpracy z Biological and Environmental Systems Group, The University of Sheffield (UK). Były to badania, w których testowałem opracowane przez współpracowników klony modelowego dla MFC szczepu bakterii *Shewanella oneidensis*, w celu oceny udziału białek TolC w transporcie elektronów z komórki bakteryjnej do anody.

Praca **H4** powstała w wyniku aktywności w Laboratory of Artificial Biology, Centre for Integrative Biology, University of Trento (Włochy), kierowanym przez prof. Martina Hanczyca. W ramach pracy we Włoszech powstała również praca w której współpracowałem z grupą z Bristol, nie ujęta w dorobku habilitacyjnym (**You et al., 2019**). W pracy tej wspólnie podjęliśmy tematykę będącą rozwinięciem wiedzy dotyczącej właściwości membran ceramicznych w układach MFC, którą przedstawiłem w pracy **H1**. Praca w University of Trento zaowocowała również publikacją pośrednio związaną z cyklem habilitacyjnym (**Pasternak and Hanczyc, 2019**). W pracy tej przedstawiłem nową koncepcję wykorzystania mechanizmu synchronizacji komórek drożdży jako mechanizmu stosowanego do detekcji fenolu. Zsynchronizowane komórki drożdży wykazują oscylacje metabolizmu, których sygnał da się zmierzyć i przetworzyć w sposób ilościowy. Sygnał ten można zakłócić poprzez udział związków toksycznych, wśród badanych związków mechanizm ten z powodzeniem wykorzystałem w przypadku fenolu – częstotliwość sygnału była liniowo ($R=0,98$) zależna od stężenia sygnału a amplituda i przesunięcie fazy pośrednio wskazywało na zakres stężeń. Wykorzystany tutaj mechanizm, częściowo pokrywa jest zbliżony do zastosowanego przeze mnie mechanizmu pracy autonomicznego biosensora MFC (**H11**).

Praca **H10**, powstała w ścisłej współpracy z instytucją Okinawa Institute of Science and Technology (Japonia), który sfinansował badania, w ramach których byłem kierownikiem projektu po stronie polskiej. Jego realizacja obejmowała również krótki, 2-dniowy pobyt w Brno University of Technology (Republika Czeska) oraz współpracę z młodym naukowcem z tej jednostki, który opracował i dostarczył komponenty układu.

Moja aktywność naukowa obejmuje również współpracę z innymi jednostkami zagranicznymi oraz krajowymi, a wspólne prace są na różnych etapach zaawansowania. Realizowana jest poprzez krótkie pobyty badawcze w instytucjach zagranicznych, których zestawienie przedstawiłem w załączniku 4, zestawienie to nie obejmuje licznych, jednodniowych wizyt roboczych. Wśród wiodących, wspólnych badań kluczowa współpraca obejmuje rozwój materiałów membranowych (Technical University of Liberec), układy elektroniczne w MFC (Sapienza University of Rome), biosurfaktanty w układach bioelektrochemicznych (University of Bremen, University of Tartu, University of Cyprus), podejście metagenomiczne do badań nad biosyntezą i biodegradacją w MFC (University of Tartu) materiały elektrodowe w elektrochemii i bioelektrochemii (Instytut Niskich

Temperatur PAN, Uniwersytet Adama Mickiewicza), oraz bio-druk 3D w układach bioelektrochemicznych (Politechnika Krakowska, Uniwersytet Jagielloński). Ponadto wspólnie z naukowcami z innych krajów zwiększam swoje wysiłki w celu uporządkowania i zestawienia obowiązującego stanu wiedzy w postaci prac przeglądowych (**Pasternak et al., 2020b, 2022; Greenman et al., 2021**). W ramach międzynarodowej sieci badawczej w projekcie COST PHOENIX, koordynowanej przez współpracowników z University of Lyon i którego jestem współtwórcą jestem zaangażowany w prace badawcze, prace komitetu sterującego oraz jako koordynator grantów ITC.

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

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Swoją karierę naukową rozpocząłem na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, gdzie podczas doktoratu oraz w pierwszych latach po jego obronie realizowałem zajęcia dydaktyczne. Po powrocie do Polski oraz zatrudnieniu na Wydziale Chemicznym PWR, kontynuowałem zaangażowanie w dydaktykę. Łącznie moja aktywność naukowa obejmuje 12 lat oraz ukończony półroczny kurs dydaktyczny. W ramach zajęć prowadziłem dotychczas zajęcia laboratoryjne z takich przedmiotów jak Mikrobiologia, Biologia i Ekologia, Toksykologia Środowiska, Environmental Toxicology (dla studentów zagranicznych), Inżynieria Bioprocusowa (Wydział Inżynierii Środowiska), wykład z przedmiotu Toksykologia, oraz obecnie – ćwiczenia z przedmiotów Inżynieria Bioreaktorów, Przemysłowe Aspekty Biotechnologii, Technologie Informacyjne. Opracowałem 2 wykłady obejmujące tematykę układów elektrochemicznych dla studentów II stopnia oraz doktorantów. Ponadto opracowałem również ćwiczenia oraz wykład łącznie dla nowych przedmiotów na Wydziale Chemicznym, w tym dla nowej specjalności „Biobased Materials” w ramach międzynarodowego programu UE Joint Master Degree:

- Technology of bioelectrochemical systems for sustainability
- Modification of recovered bio-components
- Układy bioelektrochemiczne w energetyce odnawialnej oraz inżynierii chemicznej

Podczas pracy w instytucjach zagranicznych moja praca koncentrowała się na aktywności naukowej. Niemniej jednak w trakcie zatrudnienia w University of Trento koordynowałem prace zespołu trzech studentów jako promotor pomocniczy (Federico Brunello, projekt magisterski; Giacomo Antonello, projekt licencjacki), opiekun (Bruno Santos, półroczny projekt laboratoryjny), a także doktorantki w ramach współpracy z grupą prof. Antonella Motta. Trójkę z tych osób zaangażowałem jako współautorów w realizację pracy, którą ująłem w cyklu habilitacyjnym (**H4**). Ponadto, w ramach swojej działalności zostałem zaproszony do wygłoszenia pojedynczych wykładów na temat technologii układów bioelektrochemicznych, w ramach prowadzonych w instytucie w Trento zajęć.

Obecnie sprawuję funkcję promotora pomocniczego dla trójki doktorantów, których zatrudniłem w ramach realizacji projektów NAWA oraz NCN. Łącznie sprawowałem funkcję promotora 3 prac magisterskich (wraz z obecnie realizowaną), 6 prac inżynierskich, opiekuna rocznego pobytu

studenta z Francji, promotora pomocniczego 1 pracy magisterskiej oraz dwóch prac inżynierskich. W trakcie staży sprawowałem opiekę nad studentami oraz doktorantami pochodzącymi z Włoch, Brazylii, Francji oraz Chin. Ponadto jako kierownik grupy na Politechnice Wrocławskiej aktywnie uczestniczę w programach międzynarodowych takich jak Erasmus+, w ramach, których gościłem studentów oraz doktorantów (1-3 miesiące) z Turcji, Tunezji i Włoch.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

Do najważniejszych osiągnięć organizacyjnych zaliczam uruchomienie od podstaw jednego z nielicznych w Polsce laboratoriów, całkowicie poświęconych wykorzystaniu elektroaktywności mikroorganizmów w celu produkcji prądu elektrycznego, a także jedynej w Polsce oraz jednej z nielicznych na świecie grup skupionych na połączeniu produkcji prądu, produkcji biosurfaktantów oraz biodegradacji zanieczyszczeń w jednym procesie bioreaktorowym. Głównym celem grupy jest rozwój, a dalszej perspektywie wdrożenie technologii układów bioelektrochemicznych w celu poprawy jakości środowiska oraz gospodarowania zasobami środowiskowymi w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym. Grupa, której jestem liderem składa się obecnie z 4 stałych członków oraz cyklicznie angażuje oraz gości naukowców, doktorantów, dyplomantów oraz współpracowników z innych grup badawczych oraz krajów, czego efektem jest m.in. międzynarodowa umowa badawcza z Okinawa Research Institute of Technology, prace organizacyjne i koordynacyjne w ramach sieci badawczej EU-COST, oraz finansowanie grupy z projektów NAWA oraz NCN. W ramach projektu COST pełnię funkcje kierownika zadania („Task Leader”), członka komitetu sterującego projektem („Core Team Member”) oraz koordynującego wnioski grantowe młodych naukowców oraz doktorantów („ITC Grant Coordinator”).

W ramach aktywności recenzenckiej przy ocenie grantów zostałem również zakwalifikowany jako ekspert w POIR 4.4, Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Ponadto mój wniosek jako ekspert Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej jest obecnie zakwalifikowany do fazy oceny merytorycznej, podobnie jak wniosek jako ekspert w programie Circular Biobased Economy, Komisji Europejskiej. Ponadto, jestem autorem recenzji 36 prac, w tym dla tak prestiżowych czasopism jak *Journal of Power Sources*, *Microbiome*, *Desalination*, *Science of the Total Environment*, czy *Trends in Analytical Chemistry*.

Powyższą współpracę z wydawnictwami naukowymi rozszerzyłem o funkcje edytora gościnnego w wydawnictwie MDPI (czasopismo Biosensors, IF=5.743 oraz w ramach rady redakcyjnej jako członek komitetu recenzenckiego w czasopiśmie Frontiers in Microbiology (IF=6.064).

Moja działalność organizacyjna na rzecz społeczności akademickiej wiąże się również z zaangażowaniem w wydarzenia naukowe jako przewodniczący i wiceprzewodniczący oraz członek komitetu naukowego. Na szczególną uwagę zasługuje funkcja przewodniczącego sesji na największym kongresie biosensorów w roku 2016 - „Biosensors 2016” (Gothenburg, Szwecja, 1200 uczestników z 56 krajów). Pełną listę wydarzeń zarówno po (6 wydarzeń) jak i przed (2 wydarzenia) uzyskaniem stopnia doktora, w których pełniłem wyżej wymienione funkcje umieściłem w sekcji 8, załącznika 4.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę

Do osiągnięć popularyzujących naukę zaliczam udział mojego zespołu w organizacji drzwi otwartych Laboratorium Mikrobiologicznych Układów Elektrochemicznych, którym kieruję, dla doktorantów polskich uczelni technicznych w ramach Kongresu Porozumienia Doktorantów Uczelni Technicznych (4.12.2021, Prezentujący: Natalia Tyszkiewicz i Aleksander de Rosset oraz organizację wydarzenia naukowego w charakterze warsztatów dla młodzieży i dorosłych w ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki, których celem było zapoznanie się z działaniem oraz budową MFC (15-16.09.2022, Prezentujący: Grzegorz Pasternak, Bartosz Widera, Aleksander de Rosset, Natalia Tyszkiewicz).

Działalność grupy jest szeroko opisywana w ramach prowadzonej przeze mnie strony internetowej www.gplab.eu. Ponadto jako kierownik projektów aktywnie promuję ich założenia oraz wyniki, nie tylko na konferencjach ale również w mediach tradycyjnych i mediach społecznościowych, czego efektem jest m.in. uzyskanie nagrody „Naukowiec Przyszłości 2021”, Forum Inteligentnego Rozwoju. Przykładowe artykuły oraz materiały w mediach tradycyjnych oraz mediach społecznościowych zestawiono poniżej w postaci hiperłączy, które działają w wersji elektronicznej dokumentu:

1. [Energia elektryczna z odpadów? Możliwe dzięki bakteriom](#)
2. [Innowacyjne badania laureata Programu Polskie Powroty](#)
3. [Naukowiec Politechniki Wrocławskiej opracowuje eksperymentalną metodę pozyskiwania energii elektrycznej](#)
4. [Ekotechnologia pozyskiwania energii z odpadów](#)
5. [Wymyślił, jak pozyskać prąd z bakterii i odpadów. To ekologiczna rewolucja](#)
6. [Śmieci zamienimy w zielony prąd. Innowacyjny projekt polskiego naukowca](#)
7. [Fundusz naturalnej energii](#)
8. [Pozyskiwanie prądu z bakterii i odpadów – Polacy pracują nad rewolucyjną metodą](#)
9. [W Polsce powstała innowacyjna ekotechnologia pozyskiwania energii z odpadów](#)
10. [Twitter - PWR](#)
11. [W Polsce powstała innowacyjna technologia pozyskiwania energii z odpadów](#)
12. [Twitter - Fundacja IRME](#)
13. [Twitter - NAWA Science must go on](#)
14. [Youtube - Science must go on](#)
15. [Twitter - NAWA](#)
16. [Transformacja materiałów odpadowych do energii dzięki bakteriom](#)
17. [Rzecz o Innowacjach Facebook](#)
18. [Przedstawiamy 12 laureatów I edycji programu Secundus](#)

Wcześniejsza aktywność popularyzatorska obejmuje również komunikaty prasowe w takich portalach jak wp.pl Biztok (>80.000 wyświetleń), 07.12.2014. Oraz audycję radiową w Pierwszym Programie Polskiego Radia „[Jak oczyścić środowisko w trzy miesiące, zamiast w tysiąc lat](#)”.

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

7.1. Nagrody i wyróżnienia

Wśród najważniejszych wyróżnień otrzymanych po uzyskaniu stopnia doktora, w kolejności chronologicznej, od najnowszych do najstarszych zestawilem trzy wyróżnienia: Nagrodę „Naukowiec Przyszłości”, otrzymaną za wkład w realizację innowacyjnych badań w obszarze kategorii „Nauka dla lepszego życia w przyszłości” oraz ich popularyzację; nagrodę w programie *Secundus* za aktywność publikacyjną z najwyższym wynikiem w dyscyplinie Inżynieria Chemiczna na Politechnice Wrocławskiej oraz stypendium MNSiW dla Młodych Wybitnych Naukowców. Szczegółowe zestawienie znajduje się poniżej.

Po uzyskaniu stopnia doktora:

- Nagroda Forum Inteligentnego Rozwoju, Naukowiec Przyszłości, wrzesień 2021.
- Pierwsze miejsce w programie *Secundus* Politechniki Wrocławskiej, w jednej z dwunastu dyscyplin naukowych, grudzień 2019.
- Stypendium Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Młodych Wybitnych Naukowców, 2012-2015.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

- Stypendium programu “Przedsiębiorczy doktorant - inwestycja w innowacyjny rozwój regionu”, Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego, 2010.
- Stypendium programu “Młoda kadra - stypendia dla najlepszych doktorantów i młodych naukowców”, Politechnika Wroclawska, 2010.
- Stypendium programu “GRANT - wsparcie prac badawczych poprzez stypendia naukowe dla doktorantów”, Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego, 2009.
- Nagroda Rady Miejskiej Wrocławia, 2008.
- Nagrody Prezydenta miasta Głogów, 2007-2010.
- Nagroda grantowa w programie “Leonardo da Vinci”, 2007.
- Nagrody za najlepsze wystąpienia konferencyjne: Aqua Symposium (2007, 2008), Ko-oper Field (2010).

7.2. Podsumowanie aktywności zawodowej

Jestem autorem lub współautorem 30 publikacji z listy JCR oraz dwóch rozdziałów w monografiach o zasięgu międzynarodowym. Ich łączny IF z roku publikacji wynosi **108,5** (oraz 139,9 obecnie). Liczba cytowań (z autocytoowaniami) dla wszystkich prac wynosi wg różnych źródeł od 468 (bez autocytoowań) do 790, a całkowita liczba punktów MNIŚW to 1613. Po uzyskaniu stopnia doktora

uczestniczyłem w 23 konferencjach, głównie międzynarodowych, a wyniki prowadzonych przeze mnie badań były prezentowane również przez doktorantów dla których sprawuję funkcję promotora pomocniczego (16 wystąpień). Byłem 8-krotnie delegowany do wygłoszenia wykładów (invited speaker) lub wykładów plenarnych oraz przewodniczyłem trzem sesjom na konferencjach międzynarodowych. Obecnie realizuję 2 projekty naukowe oraz zrealizowałem 2 projekty naukowe w roli kierownika projektu lub kierownika zadania po stronie polskiej. Moja aktywność w rozpowszechnianiu wyników badań jest ponadto efektem licznych staży zagranicznych, w tym ponad 4-letniego okresu pracy w instytucjach zagranicznych. Zestawienie mojej aktywności przedstawia poniższa tabela, natomiast bardziej szczegółowe zestawienia przedstawiłem również tabelarycznie w Załączniku nr 4. Omówione w niniejszej sekcji podsumowanie aktywności naukowej zestawilem w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie aktywności naukowej

Aktywność	Pozycja	Przed uzyskaniem stopnia doktora / bez autocytowań	Po uzyskaniu stopnia doktora / bez autocytowań	Suma
Publikacje	Publikacje JCR	5	25	30
	Rozdziały w monografiach	-	2	2
	Suma	5	27	32
Wskaźniki	IF	2,8	105,8	108,5
	IF (obecny)	4,4	135,5	139,9
	IF dla cyklu habilitacyjnego	-	83,9	83,9
	IF (obecny) dla cyklu habilitacyjnego	-	102,6	102,6
	Hirsch - Scopus		13	13
	Hirsch - WoS		12	12
	Hirsch - Google Scholar		13	13
	Cytowania - Scopus	1	611 / 535	612 / 536
	Cytowania - WoS	23 / 23	538 / 467	561 / 490
	Cytowania - Google Scholar	-	790	790
	Punktacja MNiSW	58	1555	1613
	Punktacja MNiSW dla cyklu habilitacyjnego	-	1030	1030
Konferencje	Krajowe	12	5	17
	Międzynarodowe	3	32	35
	Postery	5	18	23
	Referaty sesyjne	8	12	20
	Wykłady na zaproszenie oraz plenarne	-	8	8
	Przewodniczenie sesji	-	3	3
	Członkostwo w Komitecie naukowym	-	5	5
Projekty	Kierownik Projektu	-	3	3
	Główny Wykonawca	1	-	1
	Wykonawca	2	4	6
Staże zagraniczne	Długie (powyżej 2 lat)	-	2	2
	Krótkie (1-3 miesiące)	1	-	1
	Poniżej 1 miesiąca	1	5	6
Wydawnictwa	Recenzje	-	36	36
	Komitety redakcyjne	-	2	2
Patenty	Zgłoszenia patentowe	1	-	1

7.3. Plany badawcze

Moja obecna działalność oraz plany na najbliższą przyszłość obejmują realizację projektów oraz rozwój nowych metod pozyskiwania biosurfaktantów w reaktorach bioelektrochemicznych. Produkty te mogą być wykorzystywane na wewnętrzne potrzeby procesu prowadzonego w układach typu BES, w tym w bioreaktorach MFC. Mogą one być również pozyskiwane jako produkt, którego powstawanie wiąże się z również z pozyskiwaniem energii elektrycznej, co może znacznie obniżyć koszty pozyskiwania biosurfaktantów. W wyniku prowadzonych prac udało nam się doprowadzić do biosyntezy surfaktantów w anaerobowych warunkach z wykorzystaniem elektroaktywnego biofilmu oraz powiązać ich powstawanie z powstawaniem prądu elektrycznego. Moim dalsze plany obejmują kontynuację badań nad mechanistyką tego procesu, a w dalszej kolejności nad zwiększaniem jego skali oraz docelowo – komercjalizacją opracowanych rozwiązań.

Najbliższa przyszłość zawodowa obejmować będzie również dalszą rozbudowę Laboratorium Mikrobiologicznych Układów Elektrochemicznych, zarówno pod kątem infrastruktury jak i osobowym. We współpracy z jednostkami krajowymi oraz zagranicznymi planuję również wystąpić o finansowanie innych projektów, których rdzeniem jest technologia układów bioelektrochemicznych. Chcę również kontynuować swoje wysiłki nad pozyskiwaniem, w ramach konsorcjów Europejskich, funduszy pochodzących z programów ramowych UE. Najbliższe plany obejmujące aktywność organizacyjną obejmują organizację sesji w ramach kongresu SETAC 2023, dla której jestem głównym przewodniczącym oraz w roku 2024 lub 2025, organizację konferencji w tematyce układów bioelektrochemicznych.

Literatura

- Askitosari, T. D., Boto, S. T., Blank, L. M., and Rosenbaum, M. A. (2019). Boosting Heterologous Phenazine Production in *Pseudomonas putida* KT2440 Through the Exploration of the Natural Sequence Space. *Front. Microbiol.* doi: 10.3389/fmicb.2019.01990.
- Behera, M., and Ghangrekar, M. M. (2011). Electricity generation in low cost microbial fuel cell made up of earthenware of different thickness. *Water Sci. Technol.* 64, 2468–2473. doi: 10.2166/wst.2011.822.
- Chong, P., Erable, B., and Bergel, A. (2019). Effect of pore size on the current produced by 3-dimensional porous microbial anodes: A critical review. *Bioresour. Technol.* 289, 121641. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121641.
- Chung, K., Fujiki, I., and Okabe, S. (2011). Effect of formation of biofilms and chemical scale on the cathode electrode on the performance of a continuous two-chamber microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.* 102, 355–360. doi: 10.1016/j.biortech.2010.04.091.
- Erable, B., Olliot, M., Lacroix, R., Bergel, A., Serov, A., Kodali, M., et al. (2018). Iron-Nicarbazin derived platinum group metal-free electrocatalyst in scalable-size air-breathing cathodes for microbial fuel cells. *Electrochim. Acta.* doi: 10.1016/j.electacta.2018.04.190.
- Förster, A. H., Beblawy, S., Golitsch, F., and Gescher, J. (2017). Electrode-assisted acetoin production in a metabolically engineered *Escherichia coli* strain. *Biotechnol. Biofuels.* doi: 10.1186/s13068-017-0745-9.
- Fowler, G. J. S., Pereira-Medrano, A. G., Jaffe, S., Pasternak, G., Pham, T. K., Ledezma, P., et al. (2016). An iTRAQ characterisation of the role of TolC during electron transfer from *Shewanella oneidensis* MR-1. *Proteomics* 16. doi: 10.1002/pmic.201500538.
- Fu, L., You, S.-J., Yang, F., Gao, M., Fang, X., and Zhang, G. (2010). Synthesis of hydrogen peroxide in microbial fuel cell. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 85, 715–719. doi: 10.1002/jctb.2367.
- Gadkari, S., Gu, S., and Sadhukhan, J. (2018). Towards automated design of bioelectrochemical systems: A comprehensive review of mathematical models. *Chem. Eng. J.* doi: 10.1016/j.cej.2018.03.005.
- Gajda, I., Stinchcombe, A., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D., Greenman, J., et al. (2018). Miniaturized Ceramic-Based Microbial Fuel Cell for Efficient Power Generation From Urine and Stack Development. *Front. Energy Res.* 6. doi: 10.3389/fenrg.2018.00084.
- Greenman, J., Gajda, I., You, J., Mendis, B. A., Obata, O., Pasternak, G., et al. (2021). Microbial fuel cells and their electrified biofilms. *Biofilm* 3. doi: 10.1016/j.biofilm.2021.100057.
- Gul, A., Hruza, J., Dvorak, L., and Yalcinkaya, F. (2022). Chemical Cleaning Process of Polymeric Nanofibrous Membranes. *Polymers (Basel)*. 14, 1102. doi: 10.3390/polym14061102.
- Hernández-Fernández, F. J., Pérez de los Ríos, A., Salar-García, M. J., Ortiz-Martínez, V. M., Lozano-Blanco, L. J., Godínez, C., et al. (2015). Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Process. Technol.* 138, 284–297. doi: 10.1016/j.fuproc.2015.05.022.
- Ieropoulos, I., Greenman, J., and Melhuish, C. (2012). Urine utilisation by microbial fuel cells; energy fuel for the future. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 14, 94–8. doi: 10.1039/c1cp23213d.

- Ieropoulos, I., Winfield, J., Gajda, I., Walter, A., Papaharalabos, G., Jimenez, I. M., et al. (2015). *The Practical Implementation of Microbial Fuel Cell Technology*. doi: 10.1016/B978-1-78242-375-1.00012-5.
- Mayr, J. C., Grosch, J. H., Hartmann, L., Rosa, L. F. M., Spiess, A. C., and Harnisch, F. (2019). Resting *Escherichia coli* as Chassis for Microbial Electrosynthesis: Production of Chiral Alcohols. *ChemSusChem*. doi: 10.1002/cssc.201900413.
- Oakley, S., and Mihelcic, J. R. (2019). "Pathogen Reduction and Survival in Complete Treatment Works," in *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*, eds. J. R. Mihelcic and M. E. Verbyla (Michigan State University). doi: 10.14321/waterpathogens.49.
- PAP (2022). Katastrofa ekologiczna na Odrze. Pierwsze wyniki kontroli są alarmujące.
- Pasternak, G. (2021). Electrochemical approach for biogas upgrading. *Emerg. Technol. Biol. Syst. Biogas Upgrad.*, 223–254. doi: 10.1016/B978-0-12-822808-1.00009-X.
- Pasternak, G., Askitosari, T. D., and Rosenbaum, M. A. (2020a). Biosurfactants and Synthetic Surfactants in Bioelectrochemical Systems: A Mini-Review. *Front. Microbiol.* 11. doi: 10.3389/fmicb.2020.00358.
- Pasternak, G., Askitosari, T. D., and Rosenbaum, M. A. (2020b). Biosurfactants and Synthetic Surfactants in Bioelectrochemical Systems: A Mini-Review. *Front. Microbiol.* 11. doi: 10.3389/fmicb.2020.00358.
- Pasternak, G., de Rosset, A., Tyszkiewicz, N., Widera, B., Greenman, J., and Ieropoulos, I. (2022). Prevention and removal of membrane and separator biofouling in bioelectrochemical systems: a comprehensive review. *iScience* 25, 104510. doi: 10.1016/j.isci.2022.104510.
- Pasternak, G., and Hanczyc, M. M. (2019). Novel method for detecting and quantifying phenol with transient response of glycolytic oscillations of synchronised yeast cells. *Sens. Bio-Sensing Res.* doi: 10.1016/j.sbsr.2019.100259.
- Patil, S. A., Arends, J. B. A., Vanwonterghem, I., Van Meerbergen, J., Guo, K., Tyson, G. W., et al. (2015). Selective Enrichment Establishes a Stable Performing Community for Microbial Electrosynthesis of Acetate from CO₂. *Environ. Sci. Technol.* doi: 10.1021/es506149d.
- Toczyłowska-Mamińska, R., Pielech-Przybylska, K., Sekrecka-Belniak, A., and Dziekońska-Kubczak, U. (2020). Stimulation of electricity production in microbial fuel cells via regulation of syntrophic consortium development. *Appl. Energy*. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115184.
- Tong, Y., Wei, J., Mo, R., Ma, H., and Ai, F. (2022). Photocatalytic Microbial Fuel Cells and Performance Applications: A Review. *Front. Chem.* 10, 953434. doi: 10.3389/fchem.2022.953434.
- Tsompanas, M. A., You, J., Wallis, L., Greenman, J., and Ieropoulos, I. (2019). Artificial neural network simulating microbial fuel cells with different membrane materials and electrode configurations. *J. Power Sources*. doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.226832.
- WHO and UNICEF (2017). Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baseline. *World Heal. Organ.*, 66.
- Winfield, J., Chambers, L. D., Rossiter, J., and Ieropoulos, I. (2013a). Comparing the short and long

term stability of biodegradable, ceramic and cation exchange membranes in microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.* 148, 480–6. doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.163.

Winfield, J., Greenman, J., Huson, D., and Ieropoulos, I. (2013b). Comparing terracotta and earthenware for multiple functionalities in microbial fuel cells. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 36, 1913–21. doi: 10.1007/s00449-013-0967-6.

You, J., Wallis, L., Radisavljevic, N., Pasternak, G., Sglavo, V. M., Hanczyc, M. M., et al. (2019). A Comprehensive Study of Custom-Made Ceramic Separators for Microbial Fuel Cells: Towards “Living” Bricks. *Energies* 12, 4071. doi: 10.3390/en12214071.



PODPIS ZAUFANY
GRZEGORZ ŁUKASZ
PASTERNAK
13.10.2022 16:03:51 [GMT+2]
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

Grzegorz Pasternak
.....
(podpis wnioskodawcy)