



XVIII SZKOŁA MEMBRANOWA

Nowoczesne materiały
i techniki membranowe
dla potrzeb GOZ

MATERIAŁY KONFERENCYJNE



9-11 | 09 | 2026 RADOM

Niniejsza książka została opracowana na podstawie materiałów dostarczonych przez autorów.

ISBN: 978-83-7789-848-2

Redakcja techniczna:

Anna Kowalik-Klimczak

Opracowanie wydawnicze:

Anna Skrok

Wydawnictwo Naukowe

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

e-mail: organizacja-promocja@itee.lukasiewicz.gov.pl

tel. (+48) 48 364-42-41 wew. 311, 265



Sieć Badawcza Łukasiewicz

Instytut Technologii Eksploatacji

ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

(+48) 48 364-42-41

instytut@itee.lukasiewicz.gov.pl

www.itee.lukasiewicz.gov.pl

KOMITET NAUKOWY

prof. dr hab. inż. Marek Gryta, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

prof. dr hab. inż. Małgorzata Kabsch-Korbutowicz, Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. Wojciech Kujawski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,

prof. dr hab. inż. Sylwia Mozia, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

prof. dr hab. inż. Paweł Parzuchowski, Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Krystyna Prochaska, Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Jerzy Smolik, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

prof. dr hab. inż. Barbara Tomaszewska, Akademia Górniczo-Hutnicza

prof. dr hab. inż. Marian Turek, Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Maria Włodarczyk-Makuta, Politechnika Częstochowska

prof. dr hab. Małgorzata Wojtkowska, Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Rafał Łukasik, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Centrum Łukasiewicz

dr hab. inż. Gabriela Kamińska, prof. PŚ, Politechnika Śląska

dr hab. inż. Anna Marzec, prof. PŁ, Politechnika Łódzka

dr hab. inż. Jarosław Molenda, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

dr hab. inż. Mariola Rajca, prof. PŚ, Politechnika Śląska

dr hab. inż. Anna Siekierka, prof. PWr, Politechnika Wrocławska

dr hab. inż. Maciej Szwast, prof. PW, Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Renata Żyła, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny

dr inż. Anna Kowalik-Klimczak, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

dr inż. Joanna Kacprzyńska-Gotacka, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

dr inż. Bolesław Szadkowski, Politechnika Łódzka

KOMITET ORGANIZACYJNY

Anna Kowalik-Klimczak [przewodnicząca]

Jolanta Janiszewska

Bernadetta Kaźmierczak

Monika Łożyńska

Katarzyna Stawarz

Anna Skrok

Remigiusz Mazur

Mateusz Stachura

ORGANIZATOR



PATRONAT MERYTORYCZNY

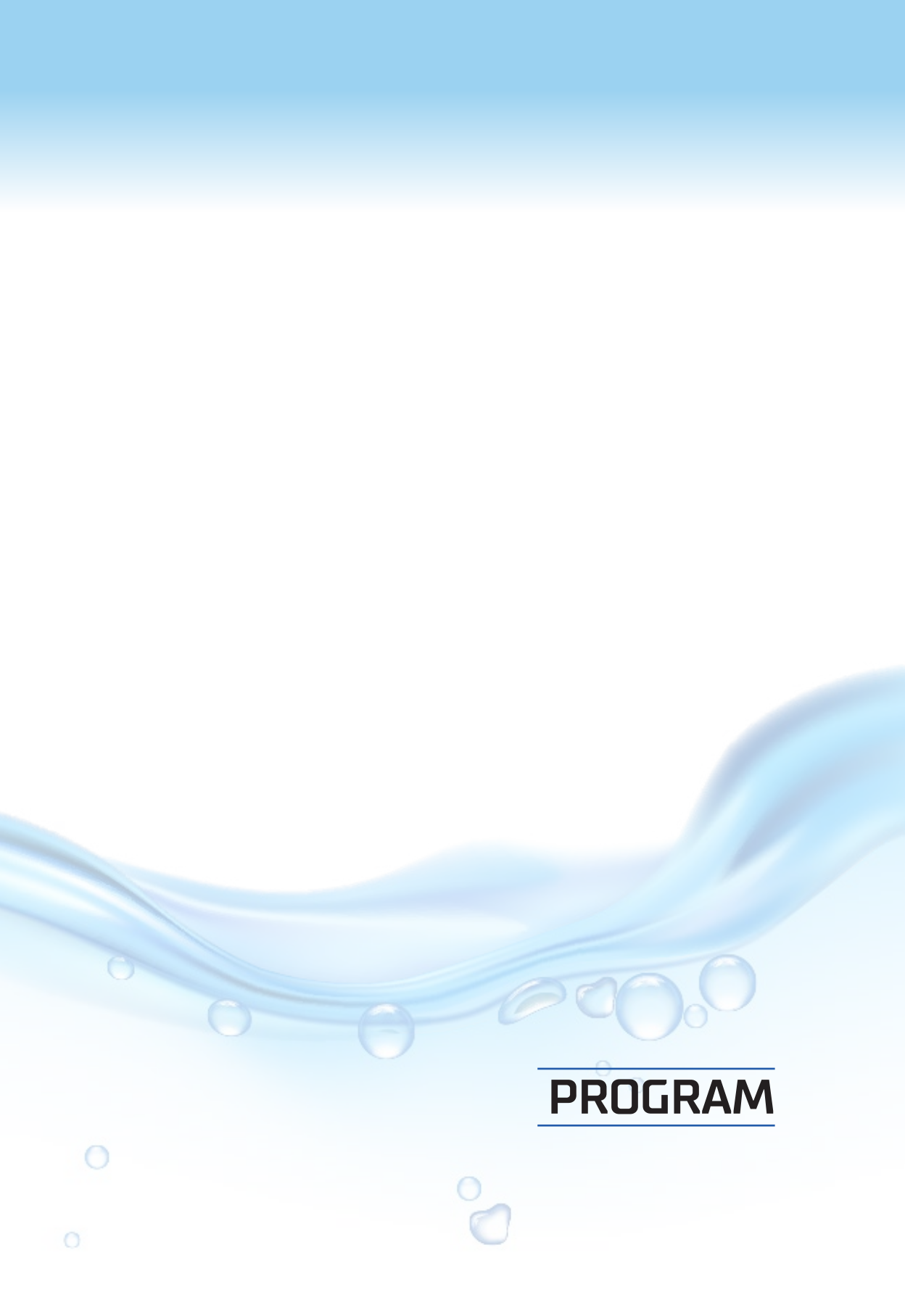


PATRONAT HONOROWY



PATRONAT MEDIALNY





PROGRAM



XVIII SZKOŁA MEMBRANOWA

Nowoczesne materiały
i techniki membranowe
dla potrzeb GOZ

9-11 | 09 | 2026 RADOM

I DZIEŃ 9.09.2026

11:00–12:00	Rejestracja gości w siedzibie Łukasiewicz – ITEE (ul. Pułaskiego 6/10, Radom)
12:00–12:10	Otwarcie konferencji i przywitanie zaproszonych gości <i>dr Adam Duszyk, Dyrektor Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji</i> <i>dr hab. inż. Jarosław Molenda, Zastępca Dyrektora Instytutu ds. badawczych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji</i> <i>prof. dr hab. inż. Rafał Łukasik, Dyrektor Departamentu Badań, Innowacji i Komercjalizacji w Sieć Badawcza Łukasiewicz</i>
12:10–12:30	Potencjał badawczo-rozwojowy Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji <i>dr hab. inż. Jarosław Molenda, Zastępca Dyrektora Instytutu ds. badawczych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji</i>
12:30–13:00	Wykład inauguracyjny: Doktorat wdrożeniowy – synergia nauki z biznesem <i>prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Politechnika Poznańska</i>
13:00–14:30	Obiad
14:30–17:00	Wycieczka dla kadry wykładowej
Pokaz I	Membranowe oczyszczanie ścieków – testy w skali pilotowej
Pokaz II	Zielona biomasa pod ciśnieniem – membranowa separacja glonów
Pokaz III	Modyfikacja powierzchni membran – możliwości wykorzystania plazmy
Pokaz IV	Od roztworu do membrany – mokra inwersja faz w praktyce
Pokaz V	Właściwości antybakteryjne membran – kierunek do redukcji biofoulingu
14:30–17:00	PANEL I – Sesja demonstracyjno-eksperymentalna dla młodych naukowców
17:00–17:30	Transport do hotelu (Leśny Ośrodek Edukacyjny, Jedlnia-Letnisko)
18:30–22:00	Kolacja (grill)



II dzień 10.09.2026

8:00–9:00	Śniadanie w hotelu
9:00–9:30	Transport do siedziby Łukasiewicz – ITEE
PANEL II – Sesja wykładowa (Prowadzący: dr hab. inż. Maciej Szwałt, prof. PW)	
9:30–10:10	Nowoczesne technologie oczyszczania wody i ścieków: co potrafią fotokatalityczne reaktory membranowe? prof. dr hab. inż. Sylwia Mozia, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
10:10–10:50	Perwaporacja – rozwiązania stosowane w odwadnianiu oraz w odsalaniu prof. dr hab. Wojciech Kujawski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
10:50–11:30	Wykorzystanie procesów membranowych w odnowie wody – odzysk wody i wartościowych składników z oczyszczonych ścieków prof. dr hab. inż. Małgorzata Kabsch-Korbutowicz, Politechnika Wrocławska
11:30–12:10	Procesy membranowe w warunkach dużego odzysku dla potrzeb GOZ prof. dr hab. inż. Marian Turek, Politechnika Śląska
12:10–12:40	Przerwa kawowa
PANEL III – Sesja wykładowa (Prowadząca: prof. dr hab. inż. Sylwia Mozia)	
12:40–13:20	Selektywne odzyskiwanie metali krytycznych ze strumieni odpadów bateryjnych z wykorzystaniem procesów elektromembranowych dr hab. inż. Anna Siekierka, Prof. PWr, Politechnika Wrocławska
13:20–14:00	Membrany hybrydowe MOF-COF w technologiach GOZ: nowe materiały, mechanizmy separacji i potencjał aplikacyjny dr hab. inż. Maciej Szwałt, Prof. PW, Politechnika Warszawska
14:00–14:40	Procesy membranowe w oczyszczaniu przemysłowych strumieni odpadowych – zamknięty obieg wody w zakładach przemysłowych dr hab. inż. Mariola Rajca, Prof. PŚ, Politechnika Śląska
14:40–15:20	Destylacja membranowa – wykorzystanie w obiegach zamkniętych prof. dr hab. inż. Marek Gryta, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
15:25–16:30	Obiad
16:30–17:30	PANEL IV – Sesja posterowa/ Konkurs na najlepszą prezentację posterową
17:30–18:00	Transport do hotelu
19:00–22:00	Uroczysta kolacja



III dzień 11.09.2026

8:00–9:00	Śniadanie w hotelu
9:00–9:30	Transport do siedziby Łukasiewicz – ITEE
PANEL V – Sesja wykładowa (Prowadzący: dr hab. inż. Jarosław Molenda)	
9:30–10:15	Wykład specjalny: Jak aplikować, żeby awansować – procedury Rady Doskonałości Naukowej prof. dr hab. inż. Maria Włodarczyk-Makuta, Politechnika Częstochowska
10:15–10:50	Rola technologii membranowych w zintegrowanych systemach oczyszczania wody i ścieków dr hab. inż. Gabriela Kamińska, prof. PŚ, Politechnika Śląska
10:50–11:25	Usuwanie produktów utleniania farmaceutyków w procesach membranowych dr hab. inż. Renata Żyła, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny
11:25–12:00	Nowoczesne wielofunkcyjne membrany polimerowe – rozwój i zastosowania dr inż. Bolestaw Szadkowski, Politechnika Łódzka
12:00–12:35	Możliwości wykorzystania technologii plazmowych do modyfikacji właściwości materiałów filtracyjnych dr inż. Joanna Kacprzyńska-Gołacka, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji
12:35–13:00	Oficjalne zakończenie i wręczenie nagrody laureatowi konkursu na najlepszą prezentację pracy posterowej dr Adam Duszyk, Dyrektor Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Technologii Eksploatacji dr hab. inż. Jarosław Molenda, Zastępca Dyrektora Instytutu ds. badawczych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji
13:00–14:30	Obiad i pożegnanie uczestników





POSTERY

Lp.	Osoba prezentująca	Tytuł posteru
1	Babilas-Krzyżowska Dorota	Badania nad blokowaniem i stabilnością membran jonowymiennych w procesie elektrodialitycznego odzysku cieczy jonowych
2	Barszcz Wioletta	Koncepcja systemu do wytwarzania biopolimerowych kompozytów na bazie alginianu w skali ćwierćtechnicznej
3	Barszcz Wioletta	Biopolimerowy kompozyt na bazie alginianu sodu: charakterystyka i właściwości separacyjne w stosunku do jonów cynku
4	Duczmał Agnieszka	Techniki membranowe w oczyszczaniu ścieków kosmetycznych jako narzędzie odzysku wody zgodnie z założeniami GOZ
5	Jakubska Justyna	Właściwości barierowe folii biodegradowalnych wypełnionych hydrożelami
6	Jakubski Łukasz	Zwiększenie strumienia permeatu w membranach do odwadniania etanolu metodą perwaporacji wypełnionych mieszkankami $ZnCr_2Se_4$, $CdCr_2Se_4$ i $CuCr_2Se_4$
7	Janiszewska Jolanta	Kształtowanie porowatej struktury membran PES za pomocą zrównoważonych dodatków węglowych
8	Kaźmierczak Bernadetta	Wykorzystanie nanofiltracji do odsalania zużytych, chromowych kąpiei garbarskich
9	Kowalik-Klimczak Anna	W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym: technologia odzysku biogenów ze ścieków, recyklingu wody oraz wytwarzania biogazu
10	Kowalik-Klimczak Anna	Multifunkcyjny system badawczy do oczyszczania przemysłowych cieczy użytkowych w obiegu zamkniętym
11	Leksa Emilia	Formowanie membran kompozytowych na bazie alginianu z dodatkiem tlenku grafenu

12	Łożyńska Monika	Powłoka ZnO-Cu jako aktywna warstwa bakteriobójcza wydłużająca czas pracy materiałów filtracyjnych do oczyszczania wody
13	Migdał Łukasz	Membrany z poliakrylonitrylu domieszkowane tlenkiem grafenu redukowanym w masie w inżynierii środowiska
14	Neska Mirosław	Membranowy system filtracji wody do produkcji zielonego wodoru
15	Neska Żaneta	Wykorzystanie filtrów membranowych w identyfikacji mikroplastików w matrycy wodnej
16	Podgórski Patryk	Badanie wpływu modyfikacji ultracienkiej warstwy nośnej membrany na jej selektywność wobec jonów jedno- i wielowartościowych
17	Polak Daniel	Wykorzystanie związków MOF-COF w procesach membranowych
18	Pszczółka Aleksandra	Ocena możliwości zastosowania mikrofiltracji do usuwania mikroplastiku ze ścieków pralniczych – badania w skali laboratoryjnej
19	Radulski Paweł	Pirolityczne zagospodarowanie membran polimerowych – wpływ temperatury i atmosfery procesu na właściwości karbonizatów o potencjalnym zastosowaniu jako dodatki tribologiczne
20	Rajewska Paulina	Wpływ właściwości reologicznych roztworu membranotwórczego na proces formowania porowatych materiałów metodą NIPS
21	Ratajczak Paweł	Kowalencyjne sieci organiczne zawierające triazyny do odzysku metali ze zużytych baterii
22	Życki Maciej	Modułowy układ wstępnego oczyszczania i separacji membranowej na potrzeby zrównoważonego odzysku surowców krytycznych





STRESZCZENIA



Nowoczesne technologie oczyszczania wody i ścieków: co potrafią fotokatalityczne reaktory membranowe?

Sylwia Mozia

*Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii
i Inżynierii Chemicznej*

sylwia.mozia@zut.edu.pl

Streszczenie: Powszechna obecność w środowisku wodnym zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego, w tym substancji takich jak farmaceutyki, związki per- i polifluoroalkilowe (PFAS) czy mikroplastik, wymusiła konieczność opracowania nowych, zaawansowanych technologii oczyszczania wody i ścieków. Należą do nich m.in. technologie oparte na separacji membranowej i zaawansowanych procesach utleniania. Wśród nich na szczególną uwagę zasługują fotokatalityczne reaktory membranowe (FRM), czyli układy hybrydowe łączące proces fotokatalityczny i separację membranową. Rolą membrany jest przede wszystkim zatrzymanie fotokatalizatora w środowisku reakcji, chociaż, w pewnych przypadkach, może ona również pełnić funkcję separacyjną w stosunku do zanieczyszczeń obecnych w oczyszczanej wodzie. Natomiast rolą fotokatalizy jest rozkład i mineralizacja zanieczyszczeń, co zachodzi w obecności fotokatalizatora i promieniowania o odpowiednio dobranej długości fali, na ogół z zakresu UV i widzialnego. Wyróżnić można dwa główne rodzaje FRM: (i) z membraną fotokatalityczną oraz (ii) z fotokatalizatorem w zawiesinie.

Znakomita większość opublikowanych badań odnosi się do rozwiązań opartych na membranie fotokatalitycznej. W tym układzie fotokatalizator jest osadzony na powierzchni membrany lub rozproszony w jej matrycy. Niezależnie od sposobu wprowadzenia fotokatalizatora, aby mógł zajść proces fotokatalityczny, konieczne jest naświetlanie membrany. W przypadku membran polimerowych, rozwiązanie takie stwarza ryzyko uszkodzenia ich struktury przez promieniowanie i reaktywne formy tlenu (np. rodniki hydroksylowe) powstające w wyniku fotokatalizy. Zaletą membran fotokatalitycznych są ich właściwości samoczyszczące i często zwiększona odporność na fouling. Właściwości te mogą być jednak utracone w trakcie prowadzenia procesu wskutek osadzania zanieczyszczeń na powierzchni membrany, co powoduje ograniczenie dostępu promieniowania do warstwy fotokatalitycznej i ogranicza efektywność fotokatalizy.



Innym podejściem są układy wykorzystujące zawiesinę fotokatalizatora. W przypadku takich konfiguracji FRM możliwe jest umieszczenie źródła promieniowania w różnych miejscach instalacji, także oddalonych od modułu membranowego, co zapewnia ochronę membrany przed działaniem promieniowania. W tym rozwiązaniu, w odróżnieniu od membran fotokatalitycznych, łatwo można wymienić zużyty fotokatalizator czy dostosować jego ilość do składu oczyszczanej nadawy.

Oba rodzaje FRM były wykorzystywane do usuwania różnego rodzaju zanieczyszczeń z wody i ścieków. Znalazły zastosowanie m.in. w usuwaniu barwników, farmaceutyków, mikroplastiku, pestycydów i in. Wyzwaniem pozostaje jednak ich wdrożenie w pełnej skali, co związane jest głównie z koniecznością opracowania aktywnych, stabilnych i tanich fotokatalizatorów. W przypadku FRM z membraną fotokatalityczną istotne jest również zapewnienie stabilności membran. Nie bez znaczenia pozostaje także sama konstrukcja fotoreaktorów i modułów membranowych, uwzględniająca wymagania procesów prowadzonych z udziałem promieniowania.

Słowa kluczowe: fotokatalityczny reaktor membranowy, membrana fotokatalityczna, fotokataliza, fotokatalizator, oczyszczanie wody i ścieków.

Podziękowanie: Praca została wykonana w ramach grantu Nr 2024/55/B/ST11/00572 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.



Wykorzystanie procesów membranowych w odnowie wody – odzysk wody i wartościowych składników z oczyszczonych ścieków

Małgorzata Kabsch-Korbutowicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska

malgorzata.kabsch-korbutowicz@pwr.edu.pl

Streszczenie: Malejące zasoby wód naturalnych oraz pogarszająca się ich jakość powodują, że coraz częściej poszukiwane są alternatywne źródła tego cennego surowca. Szczególną uwagę zwraca się na ścieki komunalne, które po odpowiednim doczyszczeniu – dostosowanym do ich docelowego przeznaczenia – mogą skutecznie uzupełnić zasoby wodne. Co więcej, przechodzenie gospodarki wodno-ściekowej z modelu liniowego na model o obiegu zamkniętym umożliwia nie tylko odzysk samej wody, ale także innych cennych składników, takich jak azot, fosfor, potas czy związki organiczne, które też mogą być źródłem energii chemicznej.

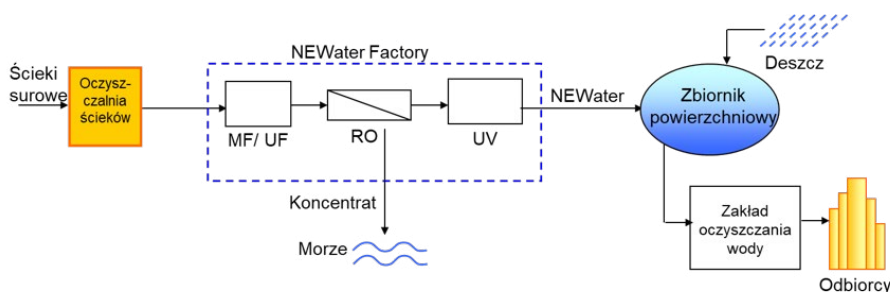
W Europie rocznie oczyszcza się około 40 mld m³ ścieków, z czego odzyskuje się jedynie 1,1 mld m³ wody. Ilość ta odpowiada zaledwie 0,5% pobieranych wód słodkich i zaspokaja przede wszystkim potrzeby rolnictwa. Zdecydowanie rzadziej odnowioną wodę wykorzystuje się w przemyśle, gospodarce komunalnej, do zasilania zasobów wód naturalnych czy w ochronie środowiska.

Choć tradycyjne metody fizyczne, chemiczne i biologiczne pozwalają usunąć ze ścieków przeważającą część zanieczyszczeń, to woda ta wciąż zawiera pewne ilości związków organicznych i nieorganicznych. W większości przypadków ich obecność wyklucza bezpośrednie ponowne wykorzystanie ścieków oczyszczonych. Ponadto zawierają one liczne mikroorganizmy, które mogą stwarzać zagrożenie dla środowiska oraz zdrowia potencjalnych użytkowników odnowionej wody.

W świetle koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym oraz charakterystyki zanieczyszczeń ściekowych, to właśnie procesy separacji membranowej – zwłaszcza ciśnieniowe i prądowe – uznaje się za najbardziej efektywne. Pozwalają one na równoczesny odzysk wody wysokiej jakości oraz zateżanie substancji organicznych i nieorganicznych w celu ich późniejszego zagospodarowania.



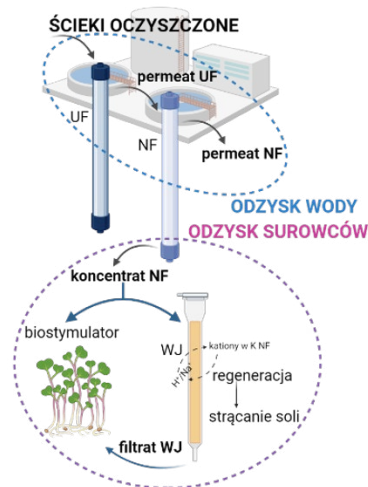
Układy technologiczne stosowane w zakładach odnowy wody na całym świecie bazują najczęściej na połączeniu nisko- (MF/UF) oraz wysokociśnieniowych (NF/RO) procesów membranowych. Pierwsze z nich służą do dezynfekcji ścieków oraz usuwania zawieszin i substancji koloidalnych, natomiast drugie pozwalają na wyeliminowanie mikrozanieczyszczeń. Doskonałym przykładem takiego rozwiązania są singapurskie zakłady odnowy wody funkcjonujące w ramach systemu NEWater (Rys. 1).



Rys. 1. System odnowy wody w Singapurze

Ze względu na wysoką zawartość substancji organicznych i nieorganicznych koncentrat powstający podczas doczyszczania ścieków stanowi cenne źródło tych surowców. Zawarte w nim związki mogą znaleźć zastosowanie jako nawóz organiczny lub biostymulator wzrostu roślin. Poddanie strumienia dalszej obróbce umożliwia odzysk składników mineralnych, takich jak azot, fosfor czy magnez, np. w postaci struwitu lub kalcytu. Schemat takiego procesu zaprezentowano na Rys. 2.

Słowa kluczowe: ścieki, odnowa wody, procesy membranowe.



Rys. 2. Odzysk wody i surowców ze ścieków oczyszczonych [Krystian Czuba: Odzysk wody i surowców z oczyszczonych ścieków komunalnych z wykorzystaniem zintegrowanego układu ultrafiltracja-nanofiltracja-wymiana jonowa. Rozprawa doktorska PWr, Wrocław 2025]



Procesy membranowe w warunkach dużego uzysku dla potrzeb GOZ

Marian Turek

Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny

marian.turek@polsl.pl

Streszczenie: Pogarszająca się dostępność wody wymusza korzystanie ze źródeł o coraz gorszych parametrach oraz jej bardziej efektywne wykorzystanie, z czym często wiąże się konieczność oczyszczania zużytej wody (ścieków) i zawracania ścieków oczyszczonych. Rosną więc wymagania dotyczące selektywności separacji niepożądanych składników, a przy tym pożądana jest mała energochłonność procesu. Procesy membranowe, w których (w większości) nie zachodzi przemiana fazowa, są z natury mniej energochłonne niż tradycyjne metody separacji.

Do separacji podstawowych składników dających mineralizację wody, tzn. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_2 , B (lokalnie również azotan i fosforan) stosowane są zarówno techniki ciśnieniowe jak i elektromembranowe. W zakresie zasolenia do wartości kilku g/l mniejsze koszty jednostkowe wykazują procesy elektromembranowe (elektrodializa – ED, elektrodializa odwracalna – EDR, elektrodejonizacja – EDI) niż ciśnieniowe (odwrócona osmoza – RO i nanofiltracja – NF). Jednakże, ze względu na inny mechanizm separacji: RO i NF zatrzymują jony i cząstki nienaładowane natomiast w ED(R) jony są przenoszone przez membrany jonowymienne, jakoś produktu separacji, tzn. permeatu RO i NF oraz diluatu ED(R), jest różna, na niekorzyść ED(R).

W wielu przypadkach wymagane jest oddzielanie jonów jednowartościowych od wielowartościowych. W nanofiltracji stosowane są membrany o bardzo zróżnicowanych wartościach współczynników retencji poszczególnych jonów: przykładowo nawet ponad 99% w przypadku SO_4^{2-} , ok. 90% [Mg^{2+}], 80% [Ca^{2+}] i zaledwie ok. 10% [Na^+ , Cl^-]. Nanofiltracja stosowana jest więc do zmiękczenia wody. W ED oddzielanie jonów jednowartościowych od wielowartościowych można uzyskać przez zastosowanie membran jonowymiennych selektywnych dla jonów jednowartościowych; selektywność ED jest jednak mniejsza niż NF.

Techniki membranowe pozwalają uniknąć wielu problemów, w tym kosztów i konieczności zagospodarowania (kolejnych) odpadów, występujących w przypadku metod chemicznych: np. usuwanie Ca^{2+} za pomocą Na_2CO_3 , podobnie Mg^{2+} za



pomocą NaOH jest kosztowne a uzyskane produkty uboczne mają małą wartość; usuwanie SO_4^{2-} metodami chemicznymi jest bardzo nieefektywne.

Nanofiltracja stosowana jest coraz częściej do usuwania siarczanu wapnia w celu uniknięcia krystalizacji gipsu w kolejnych etapach utylizacji roztworów zasolonych. Ponieważ, w celu spełnienia wymogu małodopadowości technologii, konieczna jest praca NF w warunkach dużego uzysku permeatu, tu wystąpi ryzyko krystalizacji gipsu. W celu jego uniknięcia można zastosować przekładki dystansujące nowej generacji, zapewniające duże wartości współczynników wymiany masy przy małych oporach hydraulicznych i małej wariancji rozkładu czasu przebywania (RTD); krystalizację gipsu prowadzić można w sposób kontrolowany poza modułem NF.

W przypadku elektrodializy w celu zmniejszenia ryzyka krystalizacji, najczęściej węglanu i siarczanu wapnia, a także foulingu, stosowane jest rozwiązanie, w którym okresowo zmienia się polaryzację elektrod (EDR). W klasycznym rozwiązaniu EDR, prowadzonej przy dużym uzysku diluatu, konieczna jest jednak cyrkulacja koncentratu, co znacząco zwiększa czas przebywania koncentratu i ogranicza dopuszczalną wartość przesycenia substancjami słabo rozpuszczalnymi, a więc i uzysku diluatu. Przewyciężenie tych problemów uzyskać można przez pracę w trybie *single-pass* przy różnej liniowej prędkości w komorach diluatu i koncentratu. Praca w takich warunkach, bez ryzyka przecieków i zniszczenia membran, możliwa jest z zastosowaniem wspomnianych przekładek dystansujących oraz nowatorskiego rozwiązania regulacji spadku ciśnienia w komorze koncentratu.

Przewyciężenie ograniczeń technik membranowych jak i „tradycyjnych” metod separacji można osiągnąć poprzez ich zintegrowanie, tzn. zastosowanie sekwencji poszczególnych procesów lub też połączenie poszczególnych procesów w sposób bardziej złożony, tworząc układy hybrydowe. Zastosowanie takich układów umożliwia osiągnięcie dużego uzysku cennych składników przy małej energochłonności i niskich kosztach jednostkowych.

Zwiększanie uzysku okupione jest, z reguły, znaczącym wzrostem kosztów inwestycyjnych i kosztów jednostkowych. Z tego względu nie należy dążyć do zwiększania uzysku za wszelką cenę, lecz kierować się jego wielkością racjonalną w konkretnym przypadku.

Słowa kluczowe: ciśnieniowe procesy membranowe, procesy elektromembranowe, układy zintegrowane, układy hybrydowe, RTD.

Podziękowanie: Dziękuję Pani dr inż. Hannie Jaroszek oraz Panu dr. inż. Krzysztofowi Mitko za udostępnienie narzędzi, które wykorzystałem do przygotowania prezentacji.



Selektywne odzyskiwanie metali krytycznych ze strumieni odpadów bateryjnych z wykorzystaniem procesów elektromembranowych

Anna Siekierka*, Paweł Ratajczak, Eminagha Rajabov

Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

**anna.siekierka@pwr.edu.pl*

Streszczenie: Rosnąca ilość zużytych baterii litowo-jonowych wymaga opracowania efektywnych i selektywnych metod odzysku metali o znaczeniu strategicznym, takich jak kobalt, nikiel, mangan i lit. Prowadzone badania koncentrują się na zastosowaniu nowych materiałów jonowymiennych w procesach elektrodializy (ED), dejonizacji pojemnościowej (CDI) oraz odwróconej elektrodializy (RED).

W procesie ED opracowano biopochodne membrany kationowymienne na bazie sieciowanej i chemicznie modyfikowanej żelatyny. Optymalizacja warunków syntezy i modyfikacji pozwoliła uzyskać materiały o odpowiedniej stabilności, pojemności jonowymiennej i właściwościach transportowych. Badania z wykorzystaniem roztworów modelowych oraz rzeczywistych ługów pochodzących ze zużytych baterii potwierdziły możliwość selektywnego transportu i odzysku jonów metali.

W badaniach nad CDI zastosowano kowalencyjne struktury organiczne (COF) jako selektywne materiały elektrodowe. Odpowiednia funkcjonalizacja COF umożliwiła zwiększenie powinowactwa do wybranych jonów, szczególnie kobaltu i niklu. Wyniki wskazują, że dobór struktury, grup funkcyjnych oraz metody syntezy pozwala kontrolować selektywność i efektywność odzysku metali.

Proces RED analizowano natomiast jako rozwiązanie umożliwiające jednoczesne zagospodarowanie strumieni odpadów oraz odzysk energii. Wykorzystanie wysokostężonych roztworów zawierających jony metali pochodzące z odpadów bateryjnych pozwoliło na generowanie energii w wyniku gradientu stężeń, co wskazuje na możliwość połączenia odzysku metali z produkcją energii.

Uzyskane wyniki potwierdzają potencjał procesów ED, CDI i RED jako komplementarnych technologii wspierających selektywny odzysk surowców oraz rozwój bardziej zrównoważonych metod recyklingu baterii litowo-jonowych.



Słowa kluczowe: recykling baterii litowo-jonowych, elektrodializa (ED), dejonizacja pojemnościowa (CDI), odwrócona elektrodializa (RED), kowalencyjne struktury organiczne (COF), selektywna separacja jonów.

Podziękowanie: Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu SONATA 2022/47/D/ST5/00298.



Membrany hybrydowe MOF-COF w technologiach GOZ: nowe materiały, mechanizmy separacji i potencjał aplikacyjny

Maciej Szwast*, Daniel Polak

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

**maciej.szwast@pw.edu.pl*

Streszczenie: Rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) wymaga technologii umożliwiających efektywne oczyszczanie i ponowne wykorzystanie strumieni procesowych, odzysk wartościowych składników oraz ograniczanie emisji zanieczyszczeń. Procesy membranowe dobrze wpisują się w te założenia ze względu na możliwość prowadzenia separacji w sposób ciągły, przy relatywnie niewielkim zużyciu energii oraz ograniczonej liczbie operacji jednostkowych. Jednym z perspektywicznych kierunków rozwoju materiałów membranowych jest wykorzystanie struktur metaloorganicznych (MOF) i kowalencyjnych struktur organicznych (COF), a w szczególności materiałów hybrydowych łączących właściwości obu tych grup.

W prowadzonych badaniach analizowano różne sposoby wykorzystania struktur MOF-COF w technologii membranowej. Obejmowały one zarówno kompozytowe materiały ZIF-8+TpPa-1, jak również bardziej zintegrowane struktury MOF@COF, w których faza COF jest tworzona bezpośrednio na powierzchni MOF. Materiały te stosowano do modyfikacji membran porowatych przeznaczonych do oczyszczania wody oraz jako napełniacze nieporowatych membran polimerowych typu *mixed matrix membrane* (MMM) wykorzystywanych w separacji gazów.

W przypadku membran do oczyszczania wody wykazano, że obecność struktur MOF-COF nadaje powierzchni dodatkowe właściwości sorpcyjne, pozwalając na skuteczniejsze usuwanie związków organicznych, w tym farmaceutyków. Mechanizm separacji nie ogranicza się wówczas do klasycznego efektu sitowego, lecz obejmuje również oddziaływania adsorpcyjne, takie jak wiązania wodorowe, oddziaływania elektrostatyczne i π - π . Istotnym elementem z punktu widzenia GOZ jest również możliwość regeneracji takich membran i ich wielokrotnego wykorzystania. Dodatkowo odpowiednio dobrane struktury MOF-COF mogą nadawać membranom właściwości antybakteryjne, ograniczając rozwój biofoulingu.



Drugim analizowanym obszarem jest separacja gazów, przede wszystkim selektywne wydzielanie CO_2 z mieszanin zawierających CH_4 , N_2 lub H_2 . Wprowadzenie struktur MOF-COF do matrycy polimerowej pozwala jednocześnie modyfikować przepuszczalność i selektywność membrany. Szczegółowa analiza transportu wskazuje, że kluczową rolę w poprawie właściwości separacyjnych odgrywa zwiększone powinowactwo materiału do CO_2 . Oznacza to, że właściwości membrany mogą być projektowane nie tylko poprzez kontrolowanie wielkości porów lub struktury wolnej objętości, ale również poprzez świadome kształtowanie oddziaływań między gazem a materiałem membranowym.

Szczególnie interesującym rozwinięciem tej koncepcji są zintegrowane struktury MOF@COF, w których można projektować właściwości granicy pomiędzy oboma fazami. Badania strukturalne, modelowanie molekularne oraz eksperymenty membranowe wskazują, że hybrydyzacja MOF i COF prowadzi do właściwości sorpcyjnych różniących się od właściwości pojedynczych składników. Stwarza to możliwość otrzymywania materiałów o programowalnym powinowactwie do wybranych substancji.

Uzyskane wyniki wskazują, że materiały MOF-COF stanowią perspektywiczną platformę do projektowania nowych membran dla technologii zgodnych z założeniami GOZ. Potencjalne kierunki zastosowań obejmują oczyszczanie i recyrkulację wody, usuwanie mikrozanieczyszczeń, uszlachetnianie biogazu, oczyszczanie gazu ziemnego, separację CO_2 ze strumieni przemysłowych oraz oczyszczanie wodoru. Dalszy rozwój tych technologii wymaga przede wszystkim poprawy trwałości materiałów, kontroli oddziaływań na granicy polimer-napełniacz oraz opracowania skalowalnych metod wytwarzania membran.

Słowa kluczowe: MOF-COF, membrany mieszanej matrycy, separacja CO_2 , mikrozanieczyszczenia, gospodarka o obiegu zamkniętym.

Podziękowanie: Część badań sfinansowano ze środków programu IDUB: POSTDOC PW, nr CPR-IDUB/166/Z01/2023 [Politechnika Warszawska]. Część badań sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki – OPUS 29, Nr UMO-2025/57/B/ST8/01151.Z.



Procesy membranowe w oczyszczaniu przemysłowych strumieni odpadowych – zamknięty obieg wody w zakładach przemysłowych

Mariola Rajca*, Sławomir Kempa

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

** mariola.rajca@polsl.pl*

Streszczenie: Ścieki przemysłowe w wielu przypadkach stanowią złożony strumień, zawierający mieszaninę uciążliwych zanieczyszczeń. Rosnące wymagania środowiskowe wymuszają stosowanie efektywnych metod odzysku wody ze ścieków. Oczyszczanie ścieków przemysłowych, oparte o techniki membranowe skutecznie prowadzi do odzysku wody, która może być ponownie zawracana do procesów technologicznych, pozwalając zakładom przemysłowym na oszczędne gospodarowanie tym zasobem. Przykładem takiego zastosowania jest przemysł gumowy, w którym generowane są ścieki o wysokim wskaźniku ChZT i wysokim stężeniu substancji powierzchniowo czynnych (SPC). W prezentacji omówione zostaną ciśnieniowe procesy membranowe jako podstawowe techniki membranowe stanowiące skuteczną barierę dla wielu zanieczyszczeń podczas oczyszczania wysoko obciążonych ścieków przemysłowych i odgrywające ważną rolę w tworzeniu obiegów zamkniętych w zakładach przemysłowych. Wpływ niektórych parametrów zarówno membran, jak i oczyszczanych ścieków może mieć istotne znaczenie w doborze technologii opartej na ciśnieniowych procesach membranowych. Przedstawiona zostanie analiza korzyści i ograniczeń wynikających ze stosowania tych technik, a która jest kluczowym podejściem do ustalenia optymalnych rozwiązań technicznych. Opracowanie optymalnego systemu oczyszczania i recyklingu wody z pewnością przyczyni się do ograniczenia zużycia zasobów wodnych oraz zmniejszenia negatywnego wpływu działalności zakładu przemysłowego na środowisko, wpisując się w globalne trendy zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: ciśnieniowe procesy membranowe, ścieki przemysłowe, obieg zamknięty.



Destylacja membranowa – wykorzystanie w obiegach zamkniętych

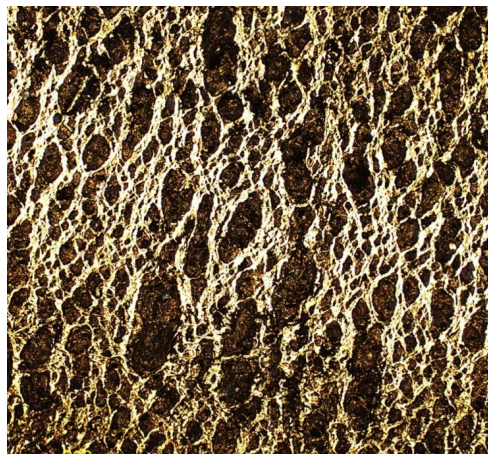
Marek Gryta

*Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej
marek.gryta@zut.edu.pl*

Streszczenie: W destylacji membranowej (MD) lotne związki strumienia zasilającego odparowują przez niezwilżone pory na drugą stronę membrany, gdzie są kondensowane. Proces zachodzi w temperaturach niższych niż klasyczna destylacja, co umożliwia wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł energii, takich jak ciepło odpadowe lub energia słoneczna. Mechanizm separacji pozwala zatrzymać niemal wszystkie zanieczyszczenia nielotne.

W systemach obiegów zamkniętych proces MD znajduje szczególne zastosowanie jako technologia umożliwiająca odzysk i ponowne wykorzystanie wody procesowej. Jej wdrożenie pozwala znacząco zmniejszyć zużycie świeżej wody oraz ograniczyć ilość ścieków odprowadzanych do środowiska. Proces MD wspiera koncepcję *Zero Liquid Discharge* (ZLD), której celem jest całkowite wyeliminowanie ciekłych odpadów poprzez maksymalny odzysk wody oraz przekształcenie pozostałości w formę stałą.

Proces MD można także zastosować w bioreaktorach membranowych do selektywnego wydzielania metabolitów z pożywki hodowlanej, co zmniejsza efekt hamowania procesu biotechnologicznego przez produkty końcowe. W rezultacie mikroorganizmy mogą dłużej utrzymywać wysoką aktywność metaboliczną, a podłoże jest efektywniej wykorzystywane. Pozwala to na wydłużenie czasu prowadzenia procesu oraz



Rys. 1. Obraz LSM polipropylenowej membrany napyłonej warstwą Au (50 nm)



zwiększenie wydajności produkcji. Dodatkową korzyścią jest zmniejszenie ilości odpadów procesowych. Ponieważ składniki pożywki mogą być wykorzystywane przez dłuższy czas, ogranicza się konieczność częstej wymiany medium i w efekcie zmniejsza się ilość ścieków wymagających dalszego oczyszczania.

Główną przyczyną utrudniającą wdrożenie powyższych rozwiązań jest zwilżanie membran przez separowane roztwory. W procesie MD stosuje się porowate membrany wykonane z silnie hydrofobowych polimerów, jak politetrafluoroetylen (PTFE), fluorek polivinyldenu (PVDF) oraz polipropylen (PP). Ich hydrofobowe właściwości zapobiegają wnikaniu wody do porów, ale jednocześnie sprzyjają adsorpcji białek i olejów (*fouling*). Wskutek polaryzacji temperaturowej i stężeniowej podczas separacji solanek stężenie soli przy powierzchni membrany osiąga stan przesylenia, czego efektem jest krystalizacja soli na membranach (*scaling*), co powoduje ich degradację i przyspiesza zwilżanie porów. W celu ograniczenia *foulingu* i *scalingu* stosuje się różne sposoby hydrofilizacji powierzchni membran. Jednym z wariantów takiej ochrony jest napylenie nanowarstwy metali, jak Ti, Cr czy Au [Rys.1]. W tym przypadku sól krystalizuje na nanoziarnach metali, co ogranicza *scaling* będący główną przyczyną niszczenia membran.

Słowa kluczowe: destylacja membranowa, membrany hydrofobowe, odzysk wody, *zero liquid discharge* (ZLD), bioreaktory membranowe.

Podziękowanie: Praca wykonana w ramach grantu nr 2025/57/B/ST8/00524, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.



Rola technologii membranowych w zintegrowanych systemach oczyszczania wody i ścieków

Gabriela Kamińska

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

gabriela.kaminska@polsl.pl

Streszczenie: Technologie membranowe odgrywają szczególną rolę w procesach uzdatniania wody oraz oczyszczania ścieków, zwłaszcza ścieków przemysłowych charakteryzujących się zmiennym i złożonym składem. W wielu gałęziach przemysłu, takich jak przemysł chemiczny, farmaceutyczny czy energetyczny, niezbędne jest przygotowanie wody o ściśle określonych parametrach jakościowych, często pozbawionej soli, związków organicznych, mikroorganizmów oraz innych zanieczyszczeń. Klasyczne procesy uzdatniania wody, stosowane do produkcji wody do picia, są często niewystarczające do uzyskania stopnia czystości wymaganego przez procesy technologiczne w przemyśle. Dlatego często techniki membranowe stanowią kluczowy element zintegrowanych systemów oczyszczania i uzdatniania wody w przemyśle. W trakcie wykładu omówione zostaną podstawowe procesy membranowe, takie jak mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja oraz odwrócona osmoza, a także ich integracja z procesami biologicznymi, adsorpcyjnymi, wymianą jonową oraz zaawansowanymi metodami utleniania. Połączenie tych technologii pozwala na skuteczne usuwanie zawiesin, substancji organicznych, metali ciężkich, związków biogennych, mikrozanieczyszczeń. Szczególna uwaga zostanie poświęcona zastosowaniu technologii membranowych w oczyszczaniu ścieków przemysłowych, które z uwagi na zawartość składników toksycznych nie podlegają procesom biodegradacji. Przedstawione zostaną przykłady wykorzystania tych technologii w gospodarce wodno-ściekowej przemysłu chemicznego, spożywczego, tekstylnego i energetycznego. Omówione zostaną również wyzwania związane z eksploatacją membran, w szczególności zjawisko *foulingu*, oraz nowoczesne strategie ograniczania jego negatywnego wpływu na efektywność procesów.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków przemysłowych, uzdatnianie wody, odzysk wody, *fouling*.



Wpływ produktów pogłębianego utleniania na skuteczność procesów nanofiltracji w usuwaniu farmaceutyków z wody i ścieków

Renata Żytła

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny

renata.zylla@lit.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Rosnąca obecność farmaceutyków, produktów ich transformacji oraz innych mikrozanieczyszczeń organicznych w środowisku wodnym stanowi istotne wyzwanie dla nowoczesnych technologii oczyszczania ścieków i odzysku wody. Konwencjonalne procesy biologiczne nie zapewniają pełnego usuwania wielu związków farmaceutycznych, które mogą przedostawać się do wód powierzchniowych i źródeł wody pitnej. W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii integrujących pogłębiane procesy utleniania (AOP) oraz techniki membranowe przeznaczone do usuwania mikrozanieczyszczeń organicznych z wody i ścieków. Pomimo licznych wdrożeń przemysłowych i badań aplikacyjnych, nadal ograniczona jest wiedza dotycząca wpływu produktów utleniania na przebieg procesów membranowych oraz mechanizmów odpowiedzialnych za ich separację. W szczególności dotyczy to związków powstających podczas częściowej degradacji farmaceutyków i innych trwałych zanieczyszczeń organicznych.

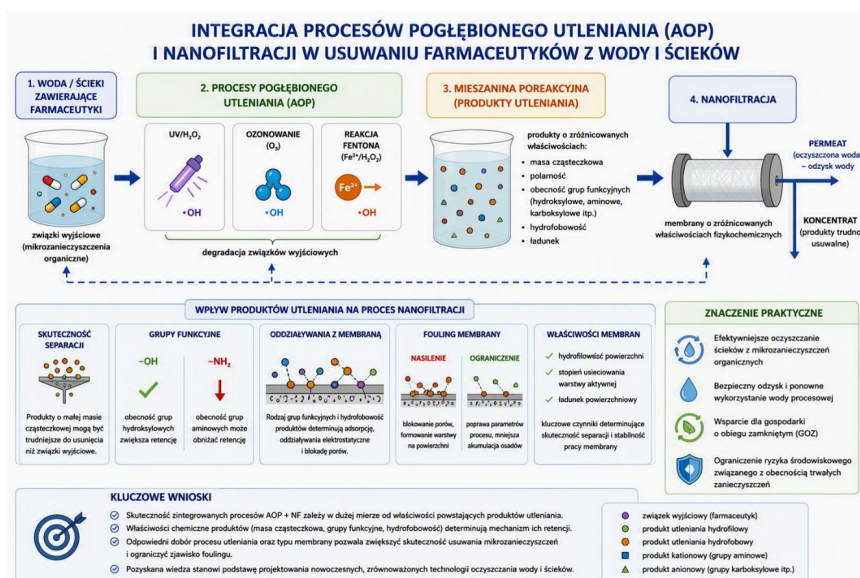
W referacie przedstawiono najważniejsze rezultaty wieloletnich badań poświęconych wzajemnym oddziaływaniom procesów pogłębianego utleniania i nanofiltracji [Rys. 1]. Uzyskane wyniki potwierdziły, że skuteczność zintegrowanych układów nie jest determinowana wyłącznie sposobem usuwania związków wyjściowych, lecz w znacznym stopniu zależy od właściwości produktów ich transformacji. Wykazano, że procesy utleniania prowadzą do powstawania produktów o zróżnicowanej strukturze chemicznej, masie cząsteczkowej, polarności i stopniu hydrofobowości, co bezpośrednio wpływa na mechanizm ich retencji oraz podatność na separację membranową.

Badania pozwoliły wykazać, że produkty utleniania mogą zarówno pogarszać, jak i poprawiać efektywność procesów membranowych. Szczególnie istotne znaczenie mają niskocząsteczkowe produkty transformacji, które często wykazują większą mobilność w układach membranowych niż związki wyjściowe.



Stwierdzono również, że obecność określonych grup funkcyjnych wpływa na oddziaływania zachodzące pomiędzy zanieczyszczeniami a powierzchnią membrany, decydując o udziale mechanizmów adsorpcji, odpychania elektrostatycznego oraz blokady przestrzennej w procesie separacji.

Wykazano, że hydrofilowość powierzchni, stopień usieciowania warstwy aktywnej oraz charakter ładunku powierzchniowego mają kluczowe znaczenie dla skuteczności separacji mikrozanieczyszczeń oraz stabilności pracy membrany. Jednocześnie potwierdzono, że produkty utleniania mogą wpływać na intensywność zjawiska *foulingu*, a tym samym na parametry eksploatacyjne całego układu technologicznego.



Rys. 1. Poglądowy schemat mechanizmów i zjawisk oddziaływania procesów pogłębionego utleniania i filtracji membranowej

Przedstawione wyniki wskazują, że efektywne projektowanie hybrydowych technologii oczyszczania ścieków wymaga uwzględnienia nie tylko kinetyki degradacji zanieczyszczeń, lecz również losów produktów ich przemian w kolejnych etapach procesu.

Słowa kluczowe: nanofiltracja, zaawansowane procesy utleniania, farmaceutyki, produkty utleniania, odzysk wody.



Nowoczesne wielofunkcyjne membrany polimerowe – rozwój i zastosowania

Bolesław Szadkowski

Politechnika Łódzka, Wydział Chemiczny

boleslaw.szadkowski@p.lodz.pl

Streszczenie: Technologie membranowe należą obecnie do dynamicznie rozwijających się obszarów inżynierii materiałowej, znajdując zastosowanie m.in. w oczyszczaniu wody, separacji gazów, energetyce, biomedycynie oraz technologii żywności. Szczególną rolę odgrywają membrany polimerowe, których zaletą jest możliwość precyzyjnego projektowania składu chemicznego, morfologii, porowatości, właściwości powierzchniowych i selektywności transportu. Współczesne badania wykraczają jednak poza klasyczne postrzeganie membrany jako pasywnej bariery separacyjnej, koncentrując się na materiałach wielofunkcyjnych i inteligentnych, zdolnych do aktywnej odpowiedzi na warunki środowiska.

W ramach wykładu przedyskutowany zostanie przegląd najnowszych doniesień literaturowych dotyczących rozwoju nowoczesnych membran polimerowych, ze szczególnym uwzględnieniem zależności między strukturą chemiczną, morfologią, mechanizmami transportu i funkcjonalnością materiału. Omówione zostaną aktualne kierunki badań nad zaawansowanymi metodami wytwarzania i funkcjonalizacji membran o właściwościach separacyjnych, antybakteryjnych, antifoulingowych, sensorycznych, samoczyszczących i responsywnych. Analizie poddany zostanie również potencjał membran kompozytowych oraz materiałów pochodzenia biologicznego w zastosowaniach środowiskowych, energetycznych i biomedycznych. Na podstawie najnowszej literatury przedyskutowane zostaną także perspektywy dalszego rozwoju technologii membranowych zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju i gospodarki obiegu zamkniętego, w tym wykorzystanie biopolimerów i zielonych rozpuszczalników, ograniczenie energochłonności procesów oraz projektowanie materiałów z uwzględnieniem całego cyklu ich życia.

Słowa kluczowe: membrany polimerowe, membrany wielofunkcyjne, inteligentne materiały, zrównoważony rozwój, technologie separacyjne.



Możliwości wykorzystania technologii plazmowych do modyfikacji właściwości materiałów filtracyjnych

Joanna Kacprzyńska-Gotacka

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

joanna.kacprzynska-golacka@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Polimery stanowią obecnie grupę materiałów przyszłościowych stosowanych na elementy filtracyjne wykorzystane w procesach filtracji, głównie ze względu na elastyczność aplikacyjną, dostępność oraz stosunkowo niską cenę. Obecnie stawiane wymagania materiałom filtracyjnym dotyczą możliwości utrzymania odpowiedniej sprawności filtracji przez cały czas eksploatacji, a także zapewnienia jak najdłuższej jego żywotności. Wydajność polimerowych filtrów często zostaje ograniczona ze względu na zjawisko *biofoulingu*, polegającego na zasiedlaniu powierzchni przez mikroorganizmy, w wyniku którego następuje spadek efektywności filtracji w czasie. Zjawisko to wprowadza konieczność oczyszczania lub częstszej wymiany elementów filtrujących, prowadząc do podniesienia kosztów filtracji. Jednym z efektywnych rozwiązań problemu zjawiska *biofoulingu* w procesach filtracji jest modyfikacja właściwości powierzchni polimerowych materiałów filtracyjnych przy wykorzystaniu technologii plazmowych. Duży potencjał magnetronowych technik inżynierii powierzchni w zakresie kształtowania składu chemicznego, mikrostruktury i grubości powłok, a także szeroka gama metod ich nanoszenia, umożliwiają wytwarzanie powłok o zróżnicowanych właściwościach użytkowych na powierzchni polimerowych materiałów filtracyjnych. W pracy przedstawiono analizę możliwości kształtowania właściwości polimerowych materiałów filtracyjnych z wykorzystaniem nowoczesnych technik inżynierii powierzchni.

Słowa kluczowe: materiały filtracyjne, polimery, rozpylanie magnetronowe, cienkie powłoki, właściwości bakteriobójcze.

Podziękowanie: Prezentowane wyniki zostały uzyskane w ramach prac zrealizowanych w dwóch projektach badawczych finansowanych ze środków NCBR [TECHMATSTRATEG-III/0005/2019-00 oraz LIDER/31/0092/L-7/15/NCBR/2016].



Badania nad blokowaniem i stabilnością membran jonowymiennych w procesie elektrodialitycznego odzysku cieczy jonowych

Dorota Babilas-Krzyżowska^{1*}, Marie Heliova², Jitka Chromikova², Julia Botor¹, Michał Bartel¹, Piotr Dydo¹

¹Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Polska

²VŠB – Technical University of Ostrava, Czechy

*dorota.babilas@polsl.pl

Streszczenie: Ciecze jonowe znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu chemicznego. Natomiast ze względu na ich szkodliwy wpływ na środowisko naturalne i organizmy żywe istotnym jest opracowanie metod ich odzysku z roztworów poprocesowych. Jedną z metod odzysku cieczy jonowych z roztworów odpadowych jest elektrodializa. Jednakże w trakcie elektrodialitycznego odzysku cieczy jonowych może dochodzić do blokowania membran jonowymiennych i ograniczenia ich żywotności i efektywności. W związku z tym przeprowadzono badania nad blokowaniem i stabilnością membran jonowymiennych w procesie elektrodialitycznego odzysku chlorku 1-etylo-3-metyloimidazoliowego oraz chlorku N,N-dibutyloimidazoliowego. Zbadano zwilżalność, morfologię powierzchni oraz skład chemiczny membran jonowymiennych przed i po procesie elektrodializy. Badania wykonano dla heterogenicznych membran: AM-A – AM-C (Ionsep, Chiny) oraz AM(H) – CM(H) (Ralex, Czechy), jak i homogenicznych membran FAB-PK – FKB-PK (Fumatech, Niemcy). Wykazano, że morfologia powierzchni membran jonowymiennych po pięciu cyklach elektrodialitycznego odzysku cieczy jonowych z roztworów wodnych nie różniła się znacząco w porównaniu z membranami przed procesem elektrodializy. Natomiast zaobserwowano niewielkie różnice w ich zwilżalności. Badania struktury chemicznej membran jonowymiennych metodą spektroskopii FTIR-ATR potwierdziły nieznaczną obecność cieczy jonowych w strukturze chemicznej membran kationowymiennych, co związane jest z migracją kationu cieczy jonowej przez te membrany w procesie elektrodializy. Należy zauważyć, że w przyszłości koniecznym jest przeprowadzenie dalszych badań nad odzyskiem cieczy jonowych ze ścieków rzeczywistych.

Słowa kluczowe: elektrodializa, ciecze jonowe, membrany jonowymienne, zwilżalność.

Podziękowanie: Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki, Polska, w ramach projektu nr 2021/43/D/ST8/02776.



Koncepcja systemu do wytwarzania biopolimerowych kompozytów na bazie alginianu w skali ćwierćtechnicznej

Wioletta Barszcz^{1,2*}, Monika Łożyńska¹, Maciej Życki¹, Marcin Domagała¹

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska

*wioletta.barszcz@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Celem prac badawczo-rozwojowych jest zaprojektowanie i wytworzenie inteligentnego stanowiska technologicznego do modelowania właściwości funkcjonalnych materiałów filtracyjnych na potrzeby gospodarki wodnej obiegu zamkniętego. Wytworzona infrastruktura badawcza będzie stanowiła innowacyjny system wspomagania zaplecza technicznego i badawczego Łukasiewicz – ITEE w zakresie oczyszczania oraz redukcji zużycia wody, w tym zamykania jej obiegów w przemyśle. Podstawową funkcjonalnością systemu będzie możliwość przeprowadzenia kompleksowych testów pilotowych wytwarzania innowacyjnego materiału w postaci kompozytu sorpcyjnego na bazie biowęgla, o pełnym zakresie struktury przestrzennej oraz różnorodnej charakterystyce fizykochemicznej. Pozwoli to na kontynuowanie prac badawczych nad innowacyjnymi materiałami sorpcyjnymi, niwelującymi niekorzystny wpływ wielkości cząstek biowęgla oraz problemy z jego odseparowaniem od medium oczyszczanego. Wytworzenie systemu do modelowania właściwości funkcjonalnych kompozytu sorpcyjnego na bazie biowęgla pozwolą na rozwój metod modyfikacji biowęgla oraz kompozytu sorpcyjnego, których celem będzie zwiększenie jego odporności na zmienne warunki pracy.

Słowa kluczowe: kompozyt sorpcyjny, adsorpcja, stanowisko prototypowe, gospodarka obiegu zamkniętego.

Podziękowanie:

Praca powstała w ramach projektu „HUB inżynierii prototypów w Przemysle 4.0 (ProtoHUB4.0)” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Fundusze Europejskie dla Mazowsza 2021–2027 [nr umowy FEMA.01.01-IP.01-09HT/25-00].



Biopolimerowy kompozyt na bazie alginianu sodu: charakterystyka i właściwości separacyjne w stosunku do jonów cynku

**Wioletta Barszcz^{1,2*}, Monika Łożyńska¹, Anna Kowalik-Klimczak¹,
Małgorzata Wojtkowska²**

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz– Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska

*wioletta.barszcz@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Celem prac było wytworzenie granulowanego materiału sorpcyjnego na bazie węgla aktywnego, poprzez jego stabilizację mikrostrukturami alginianowymi i zastosowanie jako złoża do usuwania jonów cynku z roztworów wodnych. Przygotowano pięć rodzajów mieszanin alginianu i pylistego węgla aktywnego, które następnie scharakteryzowano pod kątem zmian w lepkości dynamicznej, morfologii powierzchni, obecności grup funkcyjnych oraz właściwości separacyjnych. Analiza morfologii wskazuje na silnie niejednorodną, chropowatą i pofałdowaną strukturę powierzchni.

Na podstawie wyników zrealizowanych badań stwierdzono, że dodatek węgla aktywnego spowodował znaczny wzrost lepkości dynamicznej roztworu z 0,15 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ [alginian] do ok. 0,35 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ [alginian + 5% węgla aktywnego]. Przy czym najbardziej stabilnymi reologicznie mieszaninami były te z 1 i 2% dodatkiem węgla aktywnego. Wytworzone materiały charakteryzowały się obecnością licznych grup funkcyjnych (COO, CO, OH) na powierzchni, w porównaniu z samym węglem aktywnym. Uzyskane wyniki separacyjne pozwalają stwierdzić, iż zastosowana modyfikacja wpływa na efektywność usuwania jonów cynku z roztworu (zachowanie 70–88% skuteczności w stosunku do węgla aktywnego). Określono także, że najkorzystniejsza mieszanina, która może służyć do separacji jonów cynku z roztworów wodnych, to ta, która zawiera 1% dodatek węgla aktywnego.

Słowa kluczowe: węgiel aktywny, alginian sodu, kompozyt, adsorpcja, jony cynku.

Podziękowanie: Praca została zrealizowana w ramach programu MNiSW pn. „Doktorat Wdrożeniowy VII”.



Techniki membranowe w oczyszczaniu ścieków kosmetycznych jako narzędzie odzysku wody zgodnie z założeniami GOZ

Agnieszka Duczmal^{1,2*}, Mateusz Szczygietda¹, Ewa Kilian-Pięta², Krystyna Prochaska¹

¹Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej

²Symbiosis Sp. z o.o., Poznań

*agnieszka.duczmal@doctorate.put.poznan.pl

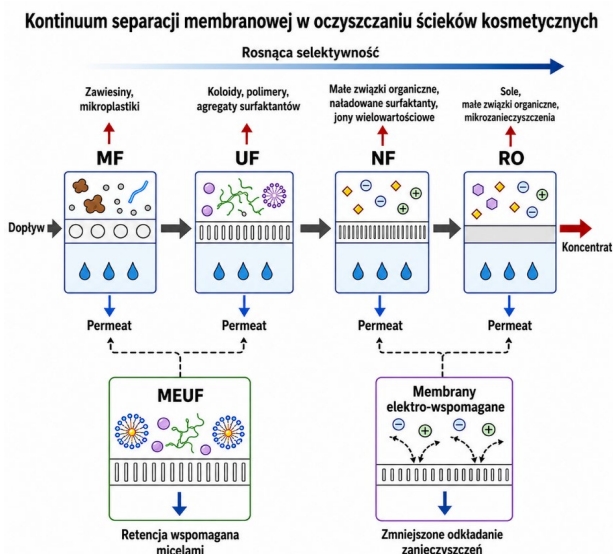
Streszczenie: Ścieki kosmetyczne stanowią silnie zróżnicowany strumień przemysłowy, powstający głównie podczas mycia aparatów, płukania linii produkcyjnych, czyszczenia zbiorników, zmian asortymentowych oraz procesów *cleaning-in-place* [1, 2]. Ich skład jest bezpośrednio związany z chemią formułacji kosmetycznych i może obejmować surfaktanty, emulgatory, oleje, woski, polimeryczne modyfikatory reologii, konserwanty, kompozycje zapachowe, filtry UV, barwniki, mikroplastiki oraz inne składniki produktów kosmetycznych [1–3]. Obecność tych związków odpowiada za wysokie obciążenie organiczne, stabilność emulsji, obniżoną biodegradowalność, toksyczność, potencjał foulingowy oraz występowanie trwałych mikrozanieczyszczeń [1, 2].

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania technik membranowych i układów hybrydowych w oczyszczaniu ścieków kosmetycznych w kontekście ponownego wykorzystania wody oraz gospodarki obiegu zamkniętego. Szczególną uwagę poświęcono mikrofiltracji, ultrafiltracji, nanofiltracji, odwróconej osmozie, micelarnej ultrafiltracji wspomaganej oraz bioreaktorom membranowym [1, 4, 5]. Procesy membranowe stanowią selektywną barierę dla frakcji zawieszonych, koloidalnych, makromolekularnych, micelarnych, jonowych i rozpuszczonych. Mikrofiltracja i ultrafiltracja mogą pełnić funkcję etapów klarowania oraz usuwania zawiesin, mikroplastików, koloidów, pozostałości polimerowych i agregatów surfaktantowych, natomiast nanofiltracja i odwrócona osmoza umożliwiają bardziej zaawansowane doczyszczanie poprzez retencję wybranych związków rozpuszczonych, jonów wielowartościowych, soli oraz mikrozanieczyszczeń [1, 4]. Bioreaktory membranowe łączą biodegradację z separacją membranową, co może poprawiać usuwanie biodegradowalnej materii organicznej, zawiesin oraz zanieczyszczeń związanych z obecnością surfaktantów [5].



Procesy membranowe rzadko są jednak wystarczające jako samodzielna metoda oczyszczania surowych ścieków kosmetycznych, ponieważ oleje, surfaktanty, krople emulsji, zagęstniki polimerowe, wysokie wartości ChZT i materia koloidalna mogą intensyfikować blokowanie porów, tworzenie warstwy placka filtracyjnego, adsorpcję na powierzchni membrany oraz wzrost ciśnienia transmembranowego [1, 4, 5]. Z tego względu bardziej uzasadnione jest projektowanie zintegrowanych układów technologicznych obejmujących wyrównywanie składu, koagulację lub elektrokoagulację, oczyszczanie biologiczne, adsorpcję lub zaawansowane utlenianie oraz końcowe doczyszczanie membranowe [1, 2]. Takie podejście może ograniczyć potencjał foulin-gowy, poprawić stabilność oczyszczonego strumienia oraz umożliwić odzysk wody do wybranych zastosowań technologicznych lub pomocniczych.

Przedstawiona koncepcja wpisuje się w założenia gospodarki obiegu zamkniętego w przemyśle kosmetycznym. Oczyszczanie skoncentrowanych strumieni procesowych u źródła, przed ich rozcieńczeniem, może zwiększyć potencjał ponownego wykorzystania wody, ograniczyć zużycie wody świeżej oraz zmniejszyć ładunek trwałych składników kosmetycznych kierowanych do systemów komunalnych [1]. Techniki membranowe i układy hybrydowe stanowią zatem obiecujące narzędzia rozwoju zamkniętych obiegów wody w produkcji kosmetyków (Rys. 1).



Rys. 1. Zakres zastosowania procesów membranowych w oczyszczaniu ścieków kosmetycznych. Opracowano na podstawie Duczmal i in. [1]



Słowa kluczowe: ścieki kosmetyczne, techniki membranowe, odzysk wody, układy hybrydowe, gospodarka obiegu zamkniętego.

Podziękowanie: Autorzy dziękują Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe (Program Doktorat Wdrożeniowy, Umowa nr DWD/9/0186/2025 z dn. 01.12.2025r.).

Literatura

- [1] Duczmal, A.; Szczygiełda, M.; Kilian-Pięta, E.; Prochaska, K. Characteristics and Methods of Treating Cosmetic Wastewater Generated by the Cosmetics Industry: A Review of Current Research. *Water* 2026, 18(15), 1831. <https://doi.org/10.3390/w18151831>.
- [2] Gkika, D.A.; Mitropoulos, A.C.; Lambropoulou, D.A.; Kalavrouziotis, I.K.; Kyzas, G.Z. Cosmetic wastewater treatment technologies: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 2022, 29, 75223–75247. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23045-1>.
- [3] Lima, J.P.P.; Melo, E.D.; Aguiar, A. Characteristics and ways of treating cosmetic wastewater generated by Brazilian industries: A review. *Process Safety and Environmental Protection* 2022, 168, 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.031>.
- [4] Ezugbe, E.O.; Rathilal, S. Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes* 2020, 10, 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.
- [5] Friha, I.; Karray, F.; Feki, F.; Jlaiel, L.; Sayadi, S. Treatment of cosmetic industry wastewater by submerged membrane bioreactor with consideration of microbial community dynamics. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2014, 88, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.12.015>.



Zwiększenie strumienia permeatu w membranach do odwadniania etanolu metodą perwaporacji wypełnionych mieszkankami ZnCr_2Se_4 , CdCr_2Se_4 , CuCr_2Se_4

Łukasz Jakubski^{1*}, Izabela Jendrzewska², Artur Chrobak³, Klaudiusz Gołombek⁴, Gabriela Dudek⁵

¹Politechnika Śląska, Szkoła Doktorów

²Uniwersytet Śląski w Katowicach, Instytut Chemii, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych,

³Uniwersytet Śląski w Katowicach, Instytut Inżynierii Materiałowej

⁴Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny

⁵Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny

*Lukasz.Jakubski@polsl.pl

Streszczenie: Konwencjonalne metody odwodnienia etanolu, takie jak destylacja azeotropowa czy ekstrakcyjna, charakteryzują się dużą energochłonnością, co wymaga poszukiwania bardziej zrównoważonych technik rozdzielania. Obiecującą alternatywę stanowi perwaporacja, jednak jej szersze zastosowanie wciąż wiąże się z koniecznością pokonania bariery w postaci powszechnego w membranach polimerowych kompromisu pomiędzy przepuszczalnością a selektywnością.

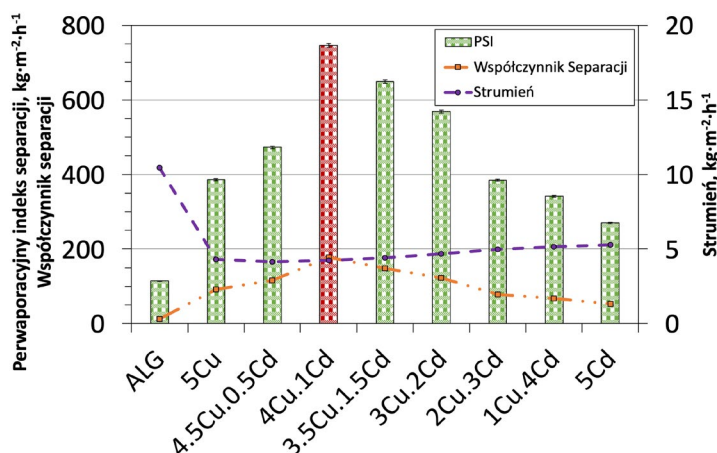
W niniejszym badaniu opracowano kompozytowe membrany na bazie alginianu sodu, zawierające związki spinelowe (CuCr_2Se_4 , ZnCr_2Se_4 oraz CdCr_2Se_4), aby zbadać wpływ wypełniaczy magnetycznych na efektywność rozdzielania mieszaniny azeotropowej woda-etanol. W badaniach zastosowano matryce, w których umieszczono mieszanki wymienionych proszków. Membrany poddano szczegółowej charakterystyce fizykochemicznej zwłaszcza pod kątem analizy ich morfologii, stopnia dyspersji wypełniacza oraz właściwości magnetycznych używanych materiałów. Eksperymenty perwaporacyjne przeprowadzono również przy zastosowaniu różnych temperatur nadawy oraz stężeń etanolu, oceniając energię aktywacji, strumień permeatu, współczynnik separacji oraz wskaźnik separacji perwaporacyjnej (PSI).

Spośród badanych materiałów membrana zawierająca połączenie CdCr_2Se_4 z CuCr_2Se_4 wykazała najkorzystniejszy stosunek między strumieniem permeatu a selektywnością, osiągając najwyższe parametry, w tym PSI sięgający



$747 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Tę znakomitą wydajność przypisuje się synergicznemu oddziaływaniu między sobą obu magnetycznych wypełniaczy.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że wprowadzenie mieszanek magnetycznych wypełniaczy pozwala na efektywne modyfikowanie właściwości transportowych membran oraz regulowanie zależności między przepuszczalnością a selektywnością w procesie odwodnienia etanolu. Podkreśla to potencjał kompozytowych membran magnetycznych jako ekologicznej alternatywy w procesach oczyszczania etanolu.



Rys. 1. Wyniki efektywności perwaporacyjnej dla membran zawierających w swoim składzie proszki CdCr_2Se_4 oraz CuCr_2Se_4 w połączeniu lub osobno, jak również czystej membrany alginianowej.

Słowa kluczowe: etanol, perwaporacja, mieszaniny azeotropowe, techniki membranowe, proszki magnetyczne.

Podziękowanie: Badania zostały sfinansowane częściowo przez Narodowe Centrum Nauki (Polska), grant nr 24/53/N/ST8/03809. W celu zapewnienia Otwartego Dostępu (Open Access) autor zastosował licencję Creative Commons Uznanie autorstwa (CC-BY) do każdej wersji Rękopisu Zaakceptowanego przez Autora (AAM) powstałej w wyniku niniejszego zgłoszenia.



Właściwości barierowe folii biodegradowalnych wypełnionych hydrożelami

Justyna Jakubska^{1*}, Adela Czerwińska², Anna Wojciech², Magdalena Pilipczuk², Gabriela Dudek²

¹Politechnika Śląska, Szkoła Doktorów

²Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny

*Justyna.Jakubska@polsl.pl

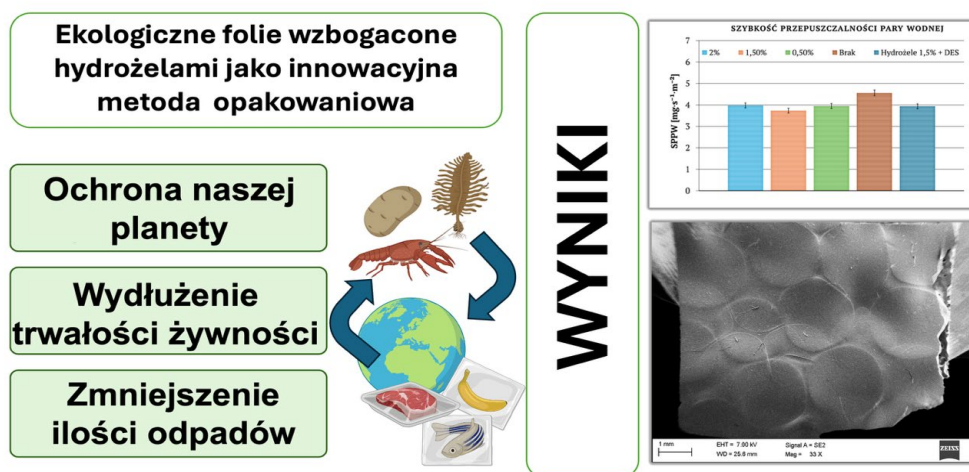
Streszczenie: Rosnący problem zanieczyszczenia środowiska odpadami z tworzyw sztucznych wymusza poszukiwanie alternatywnych, ekologicznych materiałów, które mogłyby znaleźć zastosowanie m.in. w branży opakowaniowej. Ze względu na w pełni naturalne pochodzenie i biodegradowalność, obiecującą grupą surowców do produkcji ekologicznych folii są naturalne polimery – polisacharydy. Spośród nich warto wyróżnić alginian sodu, który charakteryzuje się doskonałymi właściwościami błonotwórczymi oraz zdolnością żelowania. Cechy te pozwalają na otrzymywanie stabilnych matryc polimerowych, dodatkowo wzmacnianych procesem sieciowania jonami wapnia.

Aby jednak folie biodegradowalne mogły dorównać materiałom z tworzyw sztucznych pod względem właściwości fizykochemicznych, niezbędne jest ich odpowiednie modyfikowanie. W niniejszych badaniach skupiono się na ekologicznych wkładkach opakowaniowych, które mogłyby wspomóc pochłanianie wilgoci z zapakowanej żywności. W tym celu opracowano matryce alginianowe, dodatkowo wzbogacone cząstkami hydrożeli alginianowych, co miało poprawić ich właściwości hydrofilowe i barierowe. Ponadto do układu wprowadzono rozpuszczalnik głęboko eutektyczny, aby poprawić właściwości mechaniczne otrzymanych materiałów. Przygotowane serie folii o różnych stężeniach hydrożeli poddano szczegółowej analizie.

Pomiary właściwości barierowych na parę wodną przeprowadzono, analizując zmiany masy celek pomiarowych wypełnionych żelem krzemionkowym i szczelnie zamkniętych testowaną folią. Żel krzemionkowy absorbował wilgoć proporcjonalnie do masy cząsteczek pary wodnej przenikających przez materiał polimerowy. Ponadto wykorzystano trójstopniową metodę grawimetryczną do wyznaczenia zawartości wilgoci, stopnia spęcznienia oraz rozpuszczalności w wodzie uzyskanych folii.



Obecność fazy hydrożelowej oraz krzemionki wpłynęła na oddziaływanie folii z wilgocią, modyfikując jej właściwości barierowe. Efekt ten był najbardziej zauważalny w przypadku matryc wytworzonych z hydrożelami alginianowymi o stężeniu 0,5% i 1,5%. Niestety, obecność hydrożeli wpłynęła negatywnie na wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie przy zerwaniu otrzymanych materiałów pomimo zastosowania rozpuszczalnika głęboko eutektycznego. Z tego względu otrzymane folie nie spisywałyby się jako typowe materiały opakowaniowe. Wykazują one jednak duży potencjał w kontekście dalszych badań jako wkładki absorbujące wilgoć do zapakowanej żywności, co wpisuje się w działania na rzecz ochrony środowiska naturalnego.



Rys. 1. Folie biodegradowalne jako innowacyjna metoda opakowaniowa

Słowa kluczowe: ekologia, folie biodegradowalne, przepuszczalność pary wodnej, alginian sodu, rozpuszczalniki głęboko eutektyczne.

Podziękowanie: Badania były finansowane częściowo przez Narodowe Centrum Nauki (Polska), grant nr 24/53/N/ST11/03807. W celu zapewnienia Otwartego Dostępu (Open Access) autor zastosował licencję Creative Commons Uznanie autorstwa (CC-BY) do każdej wersji Rękopisu Zaakceptowanego przez Autora (AAM) powstałej w wyniku niniejszego zgłoszenia. Autorzy pragną podziękować Politechnice Śląskiej za wsparcie finansowe w ramach projektu IDUB.



Kształtowanie porowatej struktury membran PES za pomocą zrównoważonych dodatków węglowych

Jolanta Janiszewska^{1*}, Paulina Rajewska^{1,2}, Anna Kowalik-Klimczak¹,
Maciej Życki^{1,3}, Edyta Osuch-Stomka¹

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny

³Politechnika Łódzka, Instytut Włókiennictwa

*jolanta.janiszewska@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Współczesna inżynieria membranowa stawia wysokie wymagania w zakresie wydajności separacyjnej oraz stabilności eksploatacyjnej samych membran polimerowych. Czysty polieterosulfon (PES) jest cenionym surowcem matrycowym, jednak wykazuje tendencję do formowania asymetrycznych struktur z dominacją szerokich, otwartych makroporów palczastych. Architektura ta z jednej strony generuje wysoki strumień permeatu, ale z drugiej – obniża selektywność rozdziłu oraz drastycznie zwiększa podatność na zjawisko *foulingu*. Stąd kluczowa staje się modyfikacja mikrostruktury membran, przy czym szczególnie cenne są modyfikatory wpisujące się w zasady zrównoważonego rozwoju.

Przedmiotem badań jest ocena możliwości wykorzystania karbonizatu uzyskanego z pirolizy zużytych membran polimerowych jako ekologicznego modyfikatora struktury wewnętrznej nowych membran PES. Węglowy dodatek, otrzymany na drodze recyklingu odpadów, stanowi atrakcyjną, niskoemisyjną i ekonomiczną alternatywę dla powszechnie stosowanych, lecz drogich nanomateriałów syntetycznych. Tak zaplanowany proces wpisuje się w założenia Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ), promując strategię *waste-to-functional-filler*.

W ramach prac oceniono wpływ wprowadzenia fazy węglowej (0,5% wag.) na wykształcenie mikrostruktury kompozytu. Wyniki analizy mikroskopowej (SEM) wykazały, że dodatek węglowy skutecznie hamuje wzrost ciągłych makroporów palczastych na rzecz formowania bardziej zwartej struktury gąbczastej oraz lokalnego zwężania kanałów transportowych. Zaobserwowane zmiany dowodzą, że wtórny karbonizat pełni rolę efektywnego modyfikatora porowatości, umożliwiającego uzyskanie równowagi pomiędzy przepuszczalnością a selektywnością membran PES.

Słowa kluczowe: polieterosulfon (PES), karbonizat ze zużytych membran, mokra inwersja faz.

Podziękowanie: Praca powstała w ramach subwencji (decyzja MNiSW NR DIR-WN0.705.2.23.2026.IK z dnia 29.04.2026 r.)



Wykorzystanie nanofiltracji do odsalania zużytych, chromowych kąpiei garbarskich

Bernadetta Kaźmierczak^{1*}, Paweł Religa²

¹*Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji*

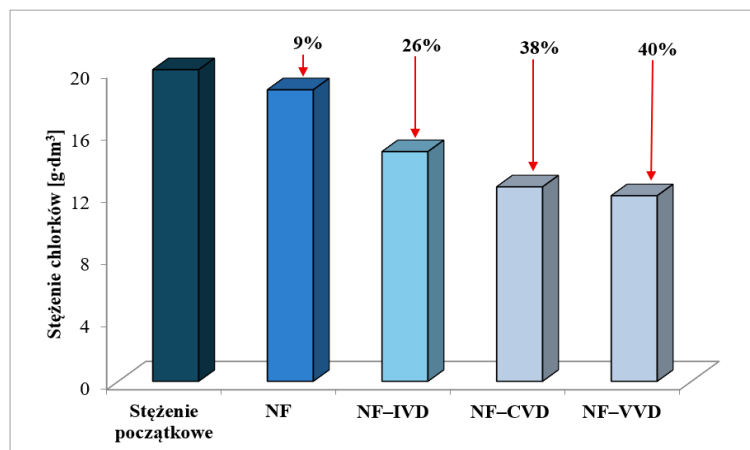
²*Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego*

**bernadetta.kazmierczak@itee.lukasiewicz.gov.pl*

Streszczenie: Wyprawa skór to proces, któremu towarzyszy powstawanie dużych ilości ścieków. Za najbardziej szkodliwe uważa się ścieki pochodzące z etapu garbowania – zużyte chromowe kąpiele garbarskie. Szkodliwość tych kąpiei wynika przede wszystkim z obecności w ich składzie chromu oraz dużego zasolenia [1–3]. Zasolenie kąpiei znacznie utrudnia zarówno ich biologiczne oczyszczanie, jak również ich bezpośrednią recyrkulację, czy efektywną separację i zatężanie chromu. Spośród nowych rozwiązań dedykowanych oczyszczaniu chromowych ścieków garbarskich z odzyskiem chromu dobre rezultaty uzyskuje się przy wykorzystaniu nanofiltracji (NF) [1–3]. Mankamentem tego rozwiązania jest obecność dużych stężeń chlorków w retentacie – zatężony roztwór chromu, przez co jego bezpośrednie, ponowne wykorzystanie w garbowaniu skór jest ograniczone.

W celu efektywnego odsolenia zużytych kąpiei garbarskich proponuje się proces nanofiltracji wspomagany diafiltracją (NF-DF). Diafiltracja to sposób prowadzenia filtracji polegający na wprowadzeniu do wstępnie zatężonego retentatu rozpuszczalnika [woda] w celu wymycia substancji małocząsteczkowych [4–6].

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wymycia soli chlorkowych z roztworów modelowych kąpiei garbarskich za pomocą procesu nanofiltracji wspomaganej różnymi metodami diafiltracji. Eksperymenty przeprowadzono w skali laboratoryjnej dla modelowych roztworów chromu(III). W każdym wariantcie NF-DF, w etapie diafiltracji wprowadzono taką samą objętość rozpuszczalnika – wody. Wyniki prac badawczych dotyczących wpływu wariantu prowadzenia procesu na poziom odmycia soli przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Poziom odmycia soli dla: NF, NF-CVD, NF-VVD, NF-IVD

Różny sposób prowadzenia diafiltracji spowodował różnice w końcowym odsole- niu badanych roztworów. Stopień wymycia soli w procesie NF-CVD wyniósł 38%. W NF-IVD wyniósł 26%. Natomiast wymycie soli w procesie NF-VVD wyniosło 40% [Rys. 1]. Sposób prowadzenia procesu NF-DF nie miał natomiast większego wpływu na poziom zanieczyszczenia chromu. Retencja chromu(III) w każdym przypadku pozostawała na wysokim poziomie i wynosiła 90–95%. Uzyskane rezultaty badań potwierdzają, że prowadzenie nanofiltracji metodą diafiltracji pozwala na efek- tywne odsolenie zużytych chromowych kąpielii garbarskich. Przy czym stopień „odmycia” soli, przy tej samej ilości użytej wody, zależy od sposobu prowadzenia diafiltracji. Najkorzystniejszym rozwiązaniem było dodawanie wody w etapie dia- filtracji w ilości mniejszej niż objętość odbieranego permeatu (DF-VVD).

Słowa kluczowe: nanofiltracja, diafiltracja, roztwory chromu (III), odsalanie, zanieczyszczenie.

Literatura

- [1] Drioli E. i in. „Membranes and Integrated Membrane Operations as Clean Technologies in the Leather Industry – Review”, *Clean Technol.* 5 [2023], 274–296.
- [2] Yang F. i in. „Research recap of membrane technology for tannery wastewater treatment: a review”, *Collagen and Leather* 5 [2023], 24.
- [3] Zhao J. i in. „Tannery wastewater treatment: conventional and promising processes, an updated 20-year review”, *Journal of Leather Science and Engineering* 4 [2022], 10.



- [4] Wang L. i in. „Mathematic model of the yield for diafiltration processes”, Separation and Purification Technology 59 (2008), 206–213.
- [5] Basso R.C. i in. „Degumming and production of soy lecithin, and the cleaning of a ceramic membrane used in the ultrafiltration and diafiltration of crude soybean oil”, Journal of Membrane Science 330 (2009), 127–134.
- [6] Kovacs Z. i in. „Mathematical modeling of diafiltration”, Hungarian Journal of Industrial Chemistry 37/2 (2009), 159–164.



W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym: technologia odzysku biogenów ze ścieków, recyklingu wody oraz wytwarzania biogazu

Anna Kowalik-Klimczak

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

anna.kowalik-klimczak@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Przemysł mleczarski należy do największych gałęzi przemysłu spożywczego zarówno pod względem ogólnej masy przerabianego surowca, jak i zużycia wody. Szacuje się, że większość zakładów mleczarskich zużywa od 1 do 10 m³ wody na każdy m³ przetworzonego mleka. Zużycie wody jest uzależnione od typu produktu i wymagań procesowych. Około 80–90% zużytej wody staje się ściekami, co wymusza konieczność oszczędnego gospodarowania wodą. Efektywne korzystanie z zasobów wodnych w procesach produkcyjnych polega na minimalizowaniu strat wody i przeciwdziałaniu jej marnowaniu, co oznacza konieczność redukcji ilości ścieków przemysłowych i odzyskiwania wody do ponownego użycia, w możliwie największym stopniu. Do nowoczesnych technologii oczyszczania ścieków, które umożliwiają tworzenie zamkniętych obiegu wody można zaliczyć ciśnieniowe procesy membranowe (MF – mikrofiltracja, UF – ultrafiltracja, NF – nanofiltracja, RO – odwrócona osmoza), które znalazły już liczne zastosowania w technologiach produkcyjnych stosowanych w przemyśle mleczarskim i mogą [szczególnie MF i UF] wspomagać proces biologicznego oczyszczania ścieków mleczarskich, prowadzony metodą osadu czynnego.

Prezentowana technologia (Rys. 1) zakłada wykorzystanie odpowiednio dobranych warunków procesowych i sekwencji ciśnieniowych procesów membranowych do frakcjonowania mieszanin ścieków mleczarskich na grupy o zgrubnie zdefiniowanym składzie, ułatwiając tym samym ich dalsze wykorzystanie lub utylizację [1, 2]. Woda odzyskana ze ścieków mleczarskich charakteryzuje się wysoką jakością, umożliwiającą jej ponowne wykorzystanie w przedsiębiorstwie mleczarskim do chłodzenia, wytwarzania pary i mycia zewnętrznych powierzchni lub podłóg i samochodów ciężarowych, a także w rolnictwie do nawadniania pól i upraw. Z kolei załączone składniki organiczne o wysokiej masie cząsteczkowej (tłuszczów, białek, wielocukrów) oddzielone od substancji mineralnych w układzie procesów UF/NF mogą być powtórnie wykorzystane jako składniki podłoży hodowlanych do



rozwoju mikroalg [Chlorella sp. z gromady zielenic] [3]. Przy czym biomasa mikroalg służy jako surowiec w procesie pirolitycznego wytwarzania biowęglowych użyźniaczy gleb [4], a podłoże pochodzące jest poddawane fermentacji beztlenowej w celu wytworzenia biogazu.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie rozwiązania technologicznego umożliwiającego odzysk biogenów ze ścieków mleczarskich, recykling wody oraz produkcję biogazu

Innowacyjnością prezentowanego rozwiązania technologicznego jest zintegrowanie procesów membranowych, biotechnologicznych i termicznych we wspólnym systemie, który umożliwia bezodpadowe zagospodarowanie cieczy pożytkowych powstających w przemyśle mleczarskim. Do przetestowania założeń procesowych prezentowanej technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych niezbędna jest odpowiednia infrastruktura, która jest aktualnie wytwarzana w Łukasiewiczu – ITEE.

Słowa kluczowe: ciśnieniowe procesy membranowe, gospodarka o obiegu zamkniętym, odzysk biogenów, recykling wody, wytwarzanie biogazu.

Podziękowanie: Praca powstała w ramach projektu „Wzmocnienie kompetencji w obszarze recyklingu odpadów surowcowych pod kątem odzysku materiałów krytycznych i strategicznych przez rozbudowę infrastruktury badawczej” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Fundusze Europejskiego dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 [umowa nr FENG.02.04-IP.04-0003/25-00].



Literatura

- [1] Kowalik-Klimczak A., Journal of Membrane Science and Research 8 (2022) 530129.
- [2] Kowalik-Klimczak A., Stanisławek E., Desalination and Water Treatment 128 (2018) 364-371.
- [3] Kowalik-Klimczak A., Makowska M., Woskowicz E. Dziosa K., Journal of Machine Construction and Maintenance 4 (2019) 63-73.
- [4] Dziosa K., Makowska M., Scientific Reports 15 (2025) 20700.



Multifunkcyjny system badawczy do oczyszczania przemysłowych cieczy użytkowych w obiegu zamkniętym

Anna Kowalik-Klimczak

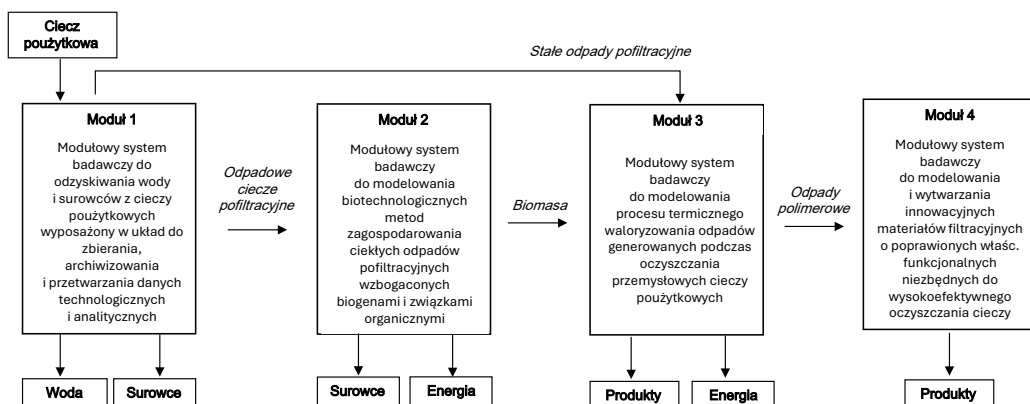
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

anna.kowalik-klimczak@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Woda w przemyśle jest fundamentalnym surowcem wykorzystywanym m.in. jako rozpuszczalnik, płyn chłodzący i płuczący. Według danych GUS (2021) największy udział w zużyciu wody w Polsce ma przemysł (6296,1 hm³; ok. 70% całkowitego zużycia), z czego zaledwie ok. 4% krąży w obiegu zamkniętym, co wskazuje na brak gotowości technologicznej polskiego przemysłu do wdrażania rozwiązań z zakresu zamykania obiegu wody. Zrównoważone zarządzanie zasobami wymusza konieczność rozwoju nowoczesnych technologii, które umożliwią: zagospodarowanie oczyszczonych ścieków (odzysk i recykling wody, zamknięcie obiegów wodnych), ograniczenie utraty wartościowych składników i zanieczyszczenia nimi środowiska oraz efektywne zagospodarowanie odpadów generowanych podczas oczyszczania ścieków. Takie działania są podstawą ekorozwoju umożliwiającego zgodnie ze światowymi trendami transformację w kierunku GOZ. Optymalizacja funkcjonowania aktualnie eksploatowanych systemów oczyszczania ścieków obejmuje szerokie spektrum działań umożliwiających opracowanie rozwiązań technologicznych, dzięki którym odzyskane surowce będą mogły być ponownie wykorzystane w przemyśle do celów produkcyjnych. Z kolei proces oczyszczania ścieków będzie realizowany przy użyciu najnowszych rozwiązań materiałowych gwarantujących wysoką efektywność procesową. Przejście z liniowego modelu gospodarczego, tj. „wyprodukuj, wykorzystaj i wyrzuć” na model z zamkniętym obiegiem surowców wymaga także zagospodarowania produktów odpadowych, powstających w wyniku przetwarzania strumieni odpadów pierwotnych. Ostatnie wydarzenia związane z katastrofą ekologiczną na Odrze pokazały, jak ważne jest projektowanie nowych, efektywnych rozwiązań technologicznych, które ograniczą niekorzystne oddziaływanie na środowisko nieodpowiednio podczyszczonych ścieków odprowadzanych do wód i gleby. Jest to szczególnie istotne w branżach przemysłowych, tak jak m.in. przemysł spożywczy, galwaniczny, wydobywczy, które charakteryzują się wysokim zużyciem wody, a znaczna jej część staje się ściekami zawierającymi surowce (biogeny, metale, sole).



Po obróbce odpowiednimi metodami ta woda może być ponownie wykorzystana. Obecnie procesy stosowane do oczyszczania przemysłowych cieczy użytkowych w obiegu zamkniętym nie są realizowane w sposób kompleksowy umożliwiający zagospodarowanie odpadów generowanych podczas tych procesów. Ograniczenia te ma zniwelować wytwarzany system badawczy (Rys. 1), który zapewnia możliwości infrastrukturalne do prowadzenia prac badawczo-rozwojowych nad metodami recyklingu wody i surowców, waloryzacji odpadów i funkcjonalności produktów wytworzonych z odpadów oraz odzyskiem energii z odpadów generowanych podczas procesów oczyszczania cieczy użytkowych.



Rys. 1. Schemat multifunkcyjnego systemu badawczego do oczyszczania przemysłowych cieczy użytkowych w obiegu zamkniętym

System ten ma służyć rozwiązaniu problemów gospodarki wodno-ściekowej przedsiębiorstw różnych branż, uwzględniając oczyszczanie cieczy w procesach membranowych [MF, UF, NF, RO], termiczne i biotechnologiczne przetwarzanie odpadów pofiltracyjnych w produkty użyteczne, a także projektowanie nowych rodzajów materiałów filtracyjnych.

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, system membranowego oczyszczania cieczy użytkowych, odzysk wody i surowców, zagospodarowanie odpadów pofiltracyjnych.

Podziękowanie: Praca powstała w ramach projektu „Wzmocnienie kompetencji w obszarze recyklingu odpadów surowcowych pod kątem odzysku materiałów krytycznych i strategicznych przez rozbudowę infrastruktury badawczej” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Fundusze Europejskiego dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 [umowa nr FENG.02.04-IP.04-0003/25-00].



Formowanie membran kompozytowych na bazie alginianu z dodatkiem tlenku grafenu

Emilia Leksa^{1*}, Daria Wieczorek², Beata Fryczkowska³, Julia Smoter⁴

Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

**s65367@student.ubb.edu.pl*

Streszczenie: Dynamiczny rozwój gospodarczy i przemysłowy oraz postępująca urbanizacja przyczyniają się do wzrostu ilości i różnorodności zanieczyszczeń przedostających się do środowiska wodnego. W związku z tym istotnym zagadnieniem staje się poszukiwanie skutecznych i przyjaznych środowisku metod oczyszczania wody. Jedną z perspektywicznych technologii oczyszczania są procesy membranowe, których efektywność w dużej mierze zależy od właściwości zastosowanych materiałów.

W pracy zaproponowano wykorzystanie kompozytowych membran na bazie alginianu sodu z dodatkiem tlenku grafenu (GO). Alginian sodu jako nietoksyczny i biodegradowalny biopolimer pozyskiwany ze ścian komórkowych brunatnic, stanowi perspektywiczny materiał do otrzymywania membran. Z kolei tlenek grafenu charakteryzuje się interesującymi właściwościami sorpcyjnymi oraz biobójczymi, co czyni go potencjalnie wartościowym dodatkiem modyfikującym właściwości membran.

Membrany kompozytowe otrzymano metodą inwersji faz z 2% wodnego roztworu alginianu sodu domieszkowanego GO na suporcie z włókniny PET, wykorzystując 2,5% wodny roztwór CaCl_2 jako kąpiel koagulacyjną. Poprzez wprowadzenie do roztworu alginianu odpowiednich ilości 3% dyspersji GO w DMF otrzymano membrany o kolejnych stężeniach GO/ALG wynoszących 0,5%, 1,5% oraz 3,0%, oznaczone odpowiednio jako A1, A2 i A3. Dodatkowo przygotowano serię membran, które po procesie formowania poddano końcowemu zanurzeniu w metanolu w celu pełniejszego usieciowania ich struktury. Otrzymane materiały poddano charakterystyce pod kątem właściwości fizycznych.

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość otrzymywania kompozytowych membran z układu GO/ALG. Wraz ze wzrostem zawartości tlenku grafenu w membranach zaobserwowano zwiększenie prędkości przepływu przez



membranę w procesie ultrafiltracji, co wskazuje na wzrost ich właściwości transportowych. Otrzymane membrany wykazywały właściwości hydrofilowe, które są pożądane w materiałach przeznaczonych do zastosowań w procesach membranowego oczyszczania wody. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość dalszego rozwoju tego typu materiałów pod kątem ich potencjalnego zastosowania w technologiach oczyszczania wód.

Słowa kluczowe: membrany kompozytowe, tlenek grafenu, oczyszczanie wód.

Podziękowanie: Serdeczne podziękowania składamy na ręce Pani prof. Gabrieli Dudek oraz Panu mgr. Pawłowi Grzybkowi z wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej za udostępnienie potrzebnych materiałów.



Powłoka ZnO-Cu jako aktywna warstwa bakteriobójcza wydłużająca czas pracy materiałów filtracyjnych do oczyszczania wody

Monika Łożyńska^{1*}, Joanna Kacprzyńska-Gotacka¹, Andrzej Krasiński²

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

*monika.lozynska@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju inżynierii powierzchni w ostatnich latach jest możliwość wytwarzania powłok o właściwościach bakteriobójczych. W tym celu wykorzystywane są nowoczesne technologie plazmowe. Ze względu na bardzo duże możliwości kształtowania składu chemicznego powłok, ich mikrostruktury i grubości, a także dużą różnorodność metod ich osadzania, umożliwiają one wytwarzanie powłok o zróżnicowanych właściwościach użytkowych.

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania technologii *High Power Impulse Magnetron Sputtering* (HiPIMS) do osadzania bakteriobójczych powłok kompozytowych wydłużających czas pracy materiałów filtracyjnych. Wytworzone powłoki badano pod kątem właściwości filtracyjnych, morfologii, struktury, zwilżalności oraz właściwości bakteriobójczych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że kompozytowa powłoka ZnO-Cu może skutecznie wydłużać czas pracy materiałów filtracyjnych dzięki posiadanym właściwościom bakteriobójczym, które skutecznie ograniczają zjawisko *biofoulingu*.

Słowa kluczowe: materiały filtracyjne, rozpylanie magnetronowe, powłoka kompozytowa, właściwości bakteriobójcze.

Podziękowanie: Praca została wykonana w ramach projektu TECHMATSTRATEG III „Kompozytowe media filtracyjne o długiej żywotności do oczyszczania wody i wysoce efektywnej separacji dyspersji gaz-ciecz i ciecz-ciecz” dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [nr Techmatstrateg-III/0005/2019-00].



Membrany z poliakrylonitrylu domieszkowane tlenkiem grafenu zredukowanym w masie w inżynierii środowiska

Łukasz Migdał^{1*}

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

**lukaszmigdal22@gmail.com*

Streszczenie: Poliakrylonitryl (PAN) to niedrogi i popularny polimer inżynierski, który znajduje szerokie zastosowanie w technikach membranowych: ultrafiltracji (UF), nanofiltracji (NF), odwróconej osmozie (RO). PAN cechuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi i stabilnością termiczną, wysoką przewodnością cieplną, odpornością chemiczną i na promieniowanie UV. Jest rozpuszczalny w wielu rozpuszczalnikach, dlatego można go łatwo formować z roztworu. Można go łatwo modyfikować, nadając temu polimerowi nowe właściwości. Jednym ze sposobów modyfikacji membran PAN jest modyfikacja fizyczna, która polega na wprowadzaniu cząstek/nanocząstek innej substancji w celu otrzymania membran kompozytowych. Dodatkami do tego polimeru mogą być nanocząstki zarówno nieorganiczne, jak i organiczne. Pośród odmian alotropowych węgla wprowadzanych do kompozytów polimerowych najwięcej uwagi poświęca się nanorurkom węglowym, grafenowi i tlenkowi grafenu.

Grafen cechuje się bardzo ciekawymi właściwościami. Jednak jego zastosowanie w membranach polimerowych jest trudne. W przypadku zredukowanego tlenku grafenu (rGO) charakter hydrofobowy powoduje problemy z jego równomiernym rozproszeniem w roztworze membranotwórczym oraz z uzyskaniem jednorodnych membran kompozytowych. W celu rozwiązania tego problemu najpierw uzyskano membrany kompozytowe zawierające tlenek grafenu GO, który dzięki obecności grup tlenowych dobrze dysperguje się w rozpuszczalniku i może zostać równomiernie rozmieszczony w matrycy PAN, a dopiero po uformowaniu membran przeprowadzono redukcję hydrotermiczną GO do rGO.

W pracy zaprezentowano wyniki badań membran kompozytowych formowanych z poliakrylonitrylu domieszkowanego tlenkiem grafenu. Membrany otrzymywano metodą inwersji faz z dyspersji GO i PAN w N,N-dimetyloformamidzie (DMF).



Połowę membran wygrzewano w autoklawie w celu przeprowadzenia redukcji hydrotermicznej w masie GO do rGO. W pracy badano, w jaki sposób redukcja hydrotermiczna membran wpływa na właściwości fizykochemiczne, właściwości transportowe (UF) oraz potencjał zeta.

Słowa kluczowe: membrany kompozytowe, grafen, tlenek grafenu, poliakrylonitryl, redukcja hydrotermiczna.



Membranowy system filtracji wody do produkcji zielonego wodoru

Mirostaw Neska^{1*}, Mirostaw Mrozek^{1,2}, Jadwiga Charasińska³,
Magdalena Knapik³, Sylwia Kozłowicz³

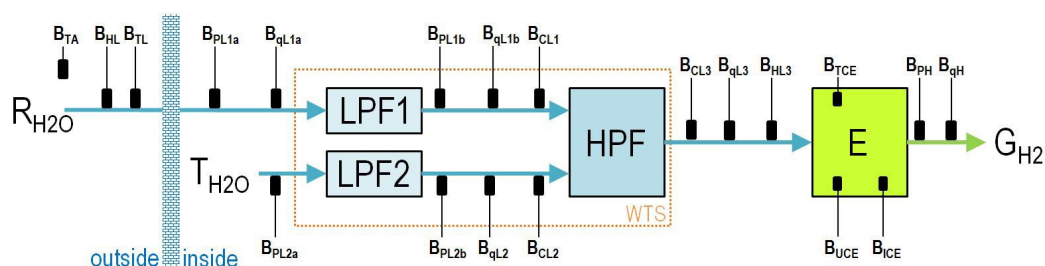
¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska

³Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych

*miroslaw.neska@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Produkcja zielonego wodoru wymaga przygotowania i dostarczania wody o odpowiedniej jakości, która może być pozyskiwana z różnych jej źródeł. Jednym z takich źródeł może być woda deszczowa, która jest powszechnie dostępna i charakteryzuje się niską przewodnością elektrolityczną. Celem prac było opracowanie membranowego systemu małej mocy do filtracji wody deszczowej i wody sieciowej (WTS) służącej produkcji zielonego wodoru, w układzie elektrolizy (Rys. 1). W projekcie systemu filtracji zastosowano wstępną filtrację mechaniczną (LPF), a jako zasadniczą, wysokociśnieniową filtrację odwróconej osmozy (HPF). Opracowane rozwiązanie może stanowić podukład domowego systemu przygotowania wody do produkcji zielonego wodoru i jego magazynowania. Takie alternatywne paliwo może służyć produkcji ciepła użytkowego lub energii elektrycznej w małych domowych instalacjach energetycznych.



Rys. 1. Schemat blokowy membranowego systemu filtracji wody do produkcji zielonego wodoru; R_{H_2O} – woda deszczowa; T_{H_2O} – woda sieciowa; B – czujniki wielkości fizycznych; LPF – wstępna, niskociśnieniowa filtracja mechaniczna; HPF – zasadnicza, wysokociśnieniowa filtracja wody; E – elektroliza wody; G_{H_2} – wodór gazowy



XVIII SZKOŁA MEMBRANOWA

Nowoczesne materiały
i techniki membranowe
dla potrzeb GOZ

9-11 | 09 | 2026 RADOM

Słowa kluczowe: membrany, filtracja, woda deszczowa, odwrócona osmoza, zielony wodór.

Podziękowanie: Projekt zrealizowano w ramach programu Dotacja Celowa Centrum Łukasiewicz nr 1/Ł-ITEE/CŁ/2022.



Wykorzystanie filtrów membranowych w identyfikacji mikroplastików obecnych w matrycy wodnej

Żaneta Neska*, Aleksandra Pszczoła, Anna Kowalik-Klimczak, Edyta Osuch-Słomka

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

**zaneta.neska@itee.lukasiewicz.gov.pl*

Streszczenie: Mikroplastik (MP) definiuje się jako dyskretny, stały obiekt matrycowy, charakteryzujący się brakiem rozpuszczalności w środowisku wodnym. Pod względem składu chemicznego materiał ten powinien w całości lub częściowo składać się z polimerów syntetycznych bądź polimerów pochodzenia naturalnego, które zostały poddane celowej modyfikacji chemicznej zmieniającej ich pierwotną strukturę. Zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184, wymiar cząstki MP nie powinien być większy niż 5 mm. Ze względu na to, że MP może wpływać na rozwój chorób związanych z układem krążenia czy nowotworów, niezbędne jest monitorowanie jego stężenia w środowisku człowieka. Kluczowym etapem w procedurze analitycznej dotyczącej identyfikacji jakościowej i ilościowej cząstek MP jest ich efektywna izolacja z próbek ciekłych. Niniejsza praca przedstawia możliwość wykorzystania filtrów membranowych w separacji MP z matrycy wodnej (woda demineralizowana) oraz ich identyfikacji metodami mikroskopowymi i spektroskopowymi. W ramach wstępnych badań przygotowano modelowe roztwory wodne zawierające cząstki MP w postaci poli(tereftalanu etylenu) (PET) pozyskanego ze zużytej butelki po wodzie pitnej, przeanalizowano możliwość wykorzystania membrany nylonowej o średnicy porów $0,22\ \mu\text{m}$ do zatrzymania cząstek MP oraz wykonano identyfikację mikrozanieczyszczeń z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) i spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (μFTIR). Zastosowany filtr membranowy z powodzeniem odseparował MP z roztworu wodnego, a jego cząstki zobrazowane za pomocą SEM charakteryzują się różnorodną wielkością (Rys. 1). Następnie cząstki MP odseparowane z matrycy wodnej na filtrze membranowym zostały scharakteryzowane za pomocą μFTIR (Rys. 2), co umożliwiło identyfikację pasm kluczowych dla PET [C – H od pierścienia aromatycznego przy dł. fali $3062\ \text{cm}^{-1}$ i $730\ \text{cm}^{-1}$, C – H od grupy metylenowej przy $2966\ \text{cm}^{-1}$ i $2903\ \text{cm}^{-1}$, C = O estrowe przy $1746\ \text{cm}^{-1}$, C = C od pierścienia benzenowego przy $1577\ \text{cm}^{-1}$].



Badanie wpływu modyfikacji ultracienkiej warstwy aktywnej membrany na jej selektywność wobec jonów jedno- i wielowartościowych

Patryk Podgórski^{*}, Paweł Grzybek^{1,2}, Gabriela Dudek¹

¹Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny

²Politechnika Śląska, Wspólna Szkoła Doktorska

*pp309748@student.polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono badania dotyczące wpływu modyfikacji ultracienkiej warstwy aktywnej membrany na jej właściwości separacyjne w procesie nanofiltracji, ze szczególnym uwzględnieniem selektywności wobec jonów jedno- i wielowartościowych. Warstwę aktywną membrany otrzymano metodą polimeryzacji międzyfazowej na porowatym podłożu z octanu celulozy. Innowacyjność badań polega na modyfikacji struktury i właściwości fizykochemicznych ultracienkiej warstwy aktywnej, co ma na celu zmianę jej porowatości, właściwości transportowych oraz morfologię, a tym samym poprawę efektywności rozdzielania jonów o różnej wartościowości. Na powierzchnię podłoża naniesiono roztwór diaminu w wodzie, następnie odparowano rozpuszczalnik oraz naniesiono roztwór chlorku kwasowego rozpuszczony w n-heksanie i ponownie odparowano rozpuszczalnik pozostający na membranie. W wyniku reakcji wytworzono warstwę na bazie poliamidu. Modyfikację warstwy aktywnej przeprowadzono poprzez wprowadzenie zdyspergowanego dodatku do roztworu diaminu użytego w procesie polimeryzacji międzyfazowej, co miało na celu zmianę struktury i właściwości fizykochemicznych powstającej warstwy separującej. Wytworzone membrany zarówno referencyjne, jak i modyfikowane, scharakteryzowano pod kątem ich struktury oraz właściwości transportowych.

Właściwości filtracyjne otrzymanych membran zbadano w warunkach filtracji krzyżowej, wyznaczając strumień permeatu oraz stopień retencji roztworów wodnych soli jonów jedno- i wielowartościowych. Analizę składu permeatu oraz nadawy przeprowadzono z wykorzystaniem metody umożliwiających oznaczenie stężeń jonów w badanych roztworach, metodą tą jest spektrometria emisyjna z plazmą sprzężoną indukcyjnie (ICP-AES). Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu zastosowanej modyfikacji warstwy aktywnej na selektywność membran.



Słowa kluczowe: nanofiltracja, membrana, poliamid, polimeryzacja międzyfazowa.

Podziękowanie: Badania zostały zrealizowane w ramach finansowania przez Unię Europejską projektem nr. FERS.05.01-IZ.00-0080/24. Dziękuję moim opiekunom naukowym: dr hab. inż. Gabrieli Dudek, prof. PŚ oraz mgr. inż. Pawłowi Grzybkowi za pomoc w realizacji badań.



Wykorzystanie związków MOF-COF w procesach membranowych

Daniel Polak*, Daniel Kowalczyk, Maciej Szwałt

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

** daniel.polak@pw.edu.pl*

Streszczenie: Struktury metaloorganiczne (ang. *Metal-Organic Frameworks*, MOF) oraz kowalencyjne szkielety organiczne (ang. *Covalent Organic Frameworks*, COF) należą do perspektywicznych grup materiałów o potencjalnym zastosowaniu do wytwarzania i modyfikacji membran. Struktury MOF są porowatymi materiałami krystalicznymi zbudowanymi z jonów lub klastrów metali połączonych organicznymi ligandami. Charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą, wysoką porowatością oraz możliwością dostosowania wielkości porów i funkcjonalizacji ich powierzchni. Natomiast COF tworzą uporządkowane, porowate sieci zbudowane z jednostek organicznych połączonych trwałymi wiązaniami kowalencyjnymi. Z kolei hybrydy MOF-COF łączą obie klasy materiałów w jednym układzie, umożliwiając synergiczne wykorzystanie wysokiej porowatości i właściwości adsorpcyjnych MOF oraz możliwości funkcjonalizacji, stabilności oraz właściwości optoelektronicznych COF.

Jednym z zastosowań struktur MOF-COF jest wytwarzanie membran heterogenicznych stosowanych w procesach separacji gazów. Wprowadzenie takich struktur do matrycy polimerowej może prowadzić do zwiększenia przepuszczalności i selektywności membran poprzez modyfikację właściwości sorpcyjnych i dyfuzyjnych materiału. Odpowiednio zaprojektowana struktura hybrydowa może również poprawiać kompatybilność napełniacza z matrycą polimerową i ograniczać powstawanie nieselektywnych defektów na granicy faz polimer-napełniacz. Połączenie kontrolowanej mikroporowatości MOF z właściwościami powierzchniowymi i możliwością funkcjonalizacji COF pozwala na tworzenie dodatkowych, selektywnych ścieżek transportu oraz zwiększenie powinowactwa membrany do wybranych składników rozdzielanej mieszaniny.

Drugim istotnym obszarem zastosowań są procesy oczyszczania wody. Membrany modyfikowane strukturami MOF-COF mogą wykazywać zwiększoną skuteczność usuwania mikrozanieczyszczeń organicznych, takich jak antybiotyki, farmaceutyki, hormony czy środki powierzchniowo czynne. W zależności od właściwości membrany i wielkości usuwanych cząsteczek mechanizm separacji może obejmować efekty sitowe, jednak w przypadku mikrozanieczyszczeń organicznych



szczególnie istotną rolę odgrywa adsorpcja na powierzchni materiału. Może ona zachodzić m.in. poprzez oddziaływania π - π , wiązania wodorowe oraz oddziaływania elektrostatyczne pomiędzy zanieczyszczeniem a powierzchnią materiału hybrydowego. Duża powierzchnia właściwa oraz obecność odpowiednich grup funkcyjnych sprawiają, że hybrydy MOF-COF mogą zwiększać zdolności sorpcyjne membran i wspomagać usuwanie związków, których rozmiary są znacznie mniejsze od porów klasycznych membran mikro- i ultrafiltracyjnych.

Dodatkowo struktury MOF-COF mogą znaleźć zastosowanie w membranowych procesach fotokatalitycznych. W odpowiednio zaprojektowanych układach kompozytowych lub hybrydowych możliwe jest wykorzystanie komplementarnych właściwości obu klas materiałów. Wiele materiałów MOF charakteryzuje się ograniczoną absorpcją promieniowania w zakresie światła widzialnego, podczas gdy właściwości optyczne i redoks materiałów COF mogą być kształtowane poprzez odpowiedni dobór ich struktury chemicznej i stopnia sprzężenia π . W heterostrukturze MOF-COF materiały COF mogą pełnić funkcję komponentów aktywnych w świetle widzialnym, absorbując promieniowanie i generując fotowzbudzone nośniki ładunku, podczas gdy komponent MOF może przyczyniać się do adsorpcji zanieczyszczeń oraz dostarczać katalitycznie aktywnych centrów metalicznych. Dodatkową potencjalną zaletą integracji struktur MOF-COF z membraną jest efekt samoczyszczenia indukowany światłem. Reakcje fotokatalityczne mogą przyczyniać się do rozkładu zaadsorbowanych substancji organicznych odpowiedzialnych za *fouling*, a tym samym ograniczać zanieczyszczanie powierzchni membrany.

Podsumowując, hybrydowe materiały MOF-COF stwarzają możliwość integracji filtracji, adsorpcji i fotokatalitycznego rozkładu zanieczyszczeń w ramach jednego układu technologicznego. Takie podejście może umożliwić prowadzenie procesu w sposób ciągły, sprzyjać jego intensyfikacji oraz w dalszej perspektywie ułatwiać skalowanie technologii. Praktyczne wdrożenie membran modyfikowanych strukturami MOF-COF pozostaje jednak uwarunkowane szeregiem wyzwań obejmujących m.in. stabilność materiałów w środowisku procesowym, trwałość immobilizacji materiału aktywnego, transport masy, penetrację światła, *fouling* oraz utrzymanie właściwości separacyjnych i aktywności fotokatalitycznej podczas długotrwałej eksploatacji.

Słowa kluczowe: MOF-COF, modyfikacja membran, separacja gazów, oczyszczanie wody, fotokataliza.

Podziękowanie: Część badań sfinansowano ze środków programu IDUB: POSTDOC PW, nr CPR-IDUB/166/Z01/2023 [Politechnika Warszawska]. Część badań sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki – OPUS 29, Nr UMO-2025/57/B/ST8/01151.Z.



Ocena możliwości zastosowania mikrofiltracji do usuwania mikroplastiku ze ścieków pralniczych – badania w skali laboratoryjnej

Aleksandra Pszczoła*, Żaneta Neska, Anna Kowalik-Klimczak, Edyta Osuch-Słomka, Monika Łożyńska

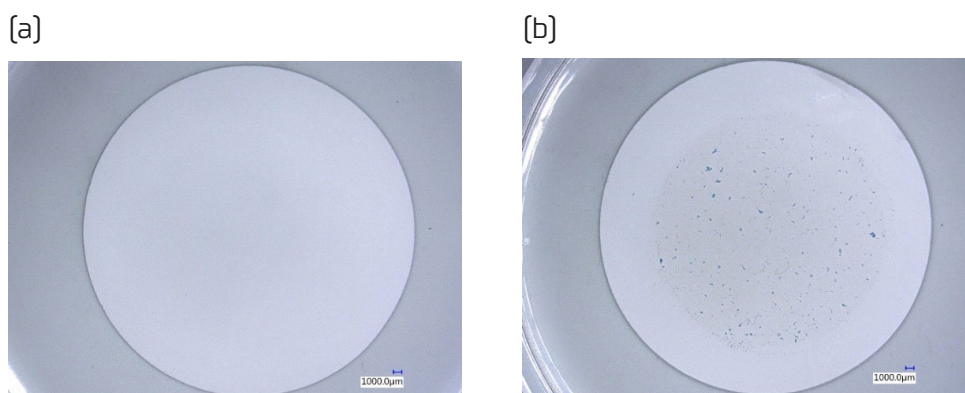
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

**aleksandra.pszczola@itee.lukasiewicz.gov.pl*

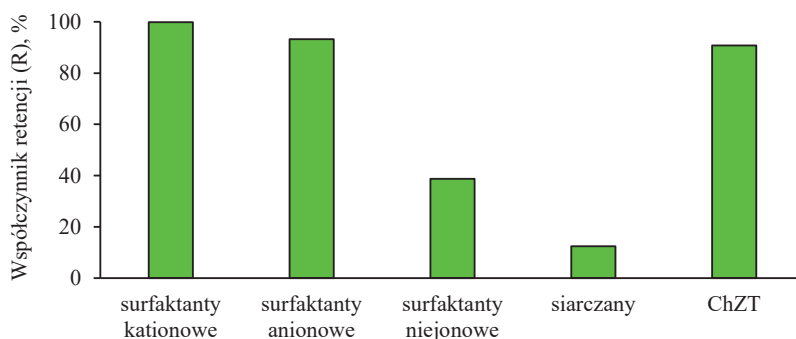
Streszczenie: Sektor pralniczy – obejmujący przemysł, szpitale, gospodarstwa domowe – generuje znaczne ilości ścieków charakteryzujących się wysokim stężeniem zanieczyszczeń organicznych i surfaktantów. W ostatnich latach szczególną uwagę zwraca się na obecność mikroplastików, uwalnianych z tekstyliów syntetycznych podczas ich prania w wyniku tarcia mechanicznego oraz kontaktu z wodą i detergentami. Ze względu na rygorystyczne normy środowiskowe oraz dążenie do ponownego wykorzystania wody (zgodne z założeniami GOZ), konieczne jest wdrażanie efektywnych metod ich oczyszczania. Celem niniejszej pracy było zbadanie skuteczności procesu mikrofiltracji (MF) w oczyszczaniu ścieków pralniczych, z uwzględnieniem możliwości usuwania cząstek mikroplastiku. Badania laboratoryjne przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu do filtracji typu *dead-end* oraz membran nylonowych o wielkości porów $0,22\ \mu\text{m}$. W badaniach użyto modelowy roztwór ścieku pralniczego, którego skład chemiczny oparto na literaturowych zakresach zanieczyszczeń rzeczywistych ścieków pralniczych [1, 2]. Modelowe roztwory ścieków pralniczych przygotowano na bazie wody wodociągowej, bulionu odżywczego, płynu do płukania, żelu do prania i oleju roślinnego oraz cząstek mikroplastiku w postaci poli(tereftalan etylenu) – (PET). W celu określenia skuteczności metody próbki modelowych ścieków przed i po MF analizowano pod kątem kluczowych wskaźników zanieczyszczeń, takich jak mętność, pH, przewodność oraz stężenie surfaktantów i wartość ChZT. Do tego celu wykorzystano testy kuwetowe LCK i spektrofotometr UV-VIS oraz mętnościomierz, pH-metr i konduktometr. Z kolei obecność cząstek PET w modelowych roztworach ścieków przed i po MF badano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego i mikroskopu optycznego. Na podstawie analizy obrazów mikroskopowych stwierdzono niemal całkowite zatrzymanie cząstek PET w procesie MF (Rys. 1). Z kolei skuteczność MF w usuwaniu pozostałych zanieczyszczeń



z modelowych roztworów ścieków pralniczych, wyznaczona w postaci procentowego ubytku ich zawartości (tzw. współczynnika retencji – R), została przedstawiona na Rys. 2.



Rys. 1. Zdjęcia próbek membran przed (a) i po (b) mikrofiltracji ścieków pralniczych wykonane za pomocą mikroskopu optycznego



Rys. 2. Skuteczność oczyszczania ścieków pralniczych w procesie mikrofiltracji

Na podstawie wyników zrealizowanych prac badawczych (Rys. 2) stwierdzono wysoką skuteczność procesu MF w usuwaniu surfaktantów kationowych ($R = 99,8\%$) i anionowych ($R = 93,2\%$) oraz związków odpowiedzialnych za wartość ChZT ($R = 90,8\%$). W kolejnych pracach zaplanowano przeprowadzenie badań nad procesem mikrofiltracji ścieków pralniczych w skali pilotowej.



Słowa kluczowe: mikroplastik, ścieki pralnicze, membrany, mikrofiltracja.

Literatura:

- [1] Cardoso, C.C.A.; Bodnar, I. *Sustainability* 2022, 14, 1314. <https://doi.org/10.3390/su14031314>
- [2] Klimonda, A.; Kowalska, I. *Membranes* 2025, 15, 125. <https://doi.org/10.3390/membranes15040125>

Podziękowanie: Praca powstała w ramach subwencji [decyzja MNiSW NR DIR-WNO.705.2.23.2026.IK z dnia 29.04.2026 r.]



Pirolityczne zagospodarowanie membran polimerowych – wpływ temperatury i atmosfery procesu na właściwości karbonizatów o potencjalnym zastosowaniu jako dodatki tribologiczne

Paweł Radulski¹, Maciej Życki^{1,2}, Wioletta Barszcz^{1,3}, Rafał Kozdrach¹, Anna Kowalik-Klimczak^{1*}

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Łódzka, Instytut Włókiennictwa

³Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska

*anna.kowalik-klimczak@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Rosnące zastosowanie technik membranowych w uzdatnianiu wody, oczyszczaniu ścieków oraz procesach przemysłowych prowadzi do systematycznego zwiększania ilości zużytych modułów, których zagospodarowanie jest utrudnione ze względu na trwałość chemiczną i złożoną budowę materiałową. Jednym z możliwych kierunków postępowania z tego rodzaju odpadami jest ich termiczne przekształcenie w produkty węglowe o nowych właściwościach użytkowych. Celem badań było określenie wpływu temperatury i atmosfery pirolizy na wydajność procesu, stopień uporządkowania struktury węglowej, morfologię oraz skład powierzchniowy wytworzonych karbonizatów, a następnie wskazanie materiału węglowego najbardziej perspektywicznego do dalszych badań tribologicznych. Rozdrobnione membrany PES i PA-TFC poddano pirolizie w temperaturze 400, 500 i 600°C, prowadzonej w atmosferze azotu (N_2) lub dwutlenku węgla (CO_2). Wytworzone materiały węglowe scharakteryzowano za pomocą spektroskopii Ramana oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) sprzężonej z analizą EDS. Wydajność otrzymywania stałej pozostałości malała wraz ze wzrostem temperatury, niezależnie od rodzaju materiału wyjściowego i atmosfery procesowej. Membrany PA-TFC pozostawiały większą ilość karbonizatu niż PES, co wskazuje na ich wyższą odporność na rozkład termiczny. Dla obu typów membran niższe wydajności uzyskiwano w atmosferze CO_2 niż w N_2 przy czym różnice były największe w temperaturze 600°C i mogły wynikać z nasilającego się częściowego zgazowania pozostałości węglowej. W temperaturze 500°C wydajność procesu wynosiła 14,5% dla PA-TFC i 11,4% dla PES w atmosferze N_2 oraz odpowiednio 13,6% i 10,4% w atmosferze CO_2 . Analiza widm



Ramana wykazała, że temperatura 400°C była niewystarczająca do wytworzenia rozwiniętej struktury węglowej, ponieważ w uzyskanych materiałach nie obserwowano charakterystycznych pasm D i G. Dla próbek otrzymanych w temperaturze 500°C dominowało pasmo G, związane z obecnością uporządkowanych domen węglowych o hybrydyzacji sp^2 . Wyniki te wskazują na powstanie materiałów o stosunkowo uporządkowanej, grafitopodobnej strukturze i ograniczonej liczbie defektów. Podwyższenie temperatury do 600°C nie powodowało dalszej poprawy uporządkowania, ponieważ w części próbek pojawiało się pasmo D, a wartości stosunku intensywności I_D/I_G mieściły się w zakresie 0,067-0,13, co świadczyło o wzroście udziału nieuporządkowanych fragmentów struktury. Obserwacje SEM karbonizatów otrzymanych przy 500°C wykazały nieregularną, miejscami włóknistą i porowatą morfologię. Rozwinięta powierzchnia cząstek może ułatwiać ich kontakt z fazą olejową środka smarnego oraz osadzanie na powierzchniach metalowych. Analiza EDS wykazała obecność głównie węgla, tlenu, azotu i siarki oraz mniejszych ilości pierwiastków pochodzących z materiałów wyjściowych. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększał się udział węgla, natomiast zmniejszała się zawartość części heteroatomów. Karbonizaty otrzymywane w atmosferze CO_2 charakteryzowały się większym powierzchniowym udziałem węgla, podczas gdy zastosowanie N_2 ograniczało utlenienie materiału, co może być korzystne dla jego stabilności chemicznej w środku smarnym. Na podstawie analizy wyników, za najbardziej perspektywiczne uznano karbonizaty wytworzone w temperaturze 500°C w atmosferze N_2 . Materiały te zapewniały optymalną równowagę pomiędzy wydajnością procesu, stopniem karbonizacji oraz uporządkowaniem struktury węglowej, która może wskazywać na grafitopodobny charakter, umiarkowaną zawartość heteroatomów i rozwiniętą morfologię powierzchni. Właściwości te mogą sprzyjać ich dyspersji w smarze, adhezji do powierzchni metalowych oraz tworzeniu warstwy poślizgowej w strefie tarcia. Wyniki zrealizowanych badań potwierdzają możliwość wykorzystania pirolizy jako metody zagospodarowania odpadowych membran polimerowych zgodnej z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym. Ocena rzeczywistej przydatności otrzymanych karbonizatów wymaga dalszych badań obejmujących ich wprowadzanie do kompozycji smarowych oraz testy właściwości przeciwzużyciowych i przeciwwzartarciowych.

Słowa kluczowe: piroliza, zagospodarowanie membran polimerowych, dodatek smarowy, gospodarka o obiegu zamkniętym.

Podziękowanie: Praca powstała w ramach subwencji [decyzja MNiSW nr DIR-W-NO.705.3.8.2025.AJ z dnia 27.06.2025 r.].



Wpływ właściwości reologicznych roztworu membranotwórczego na proces formowania porowatych materiałów metodą NIPS

**Paulina Rajewska^{1,2*}, Jolanta Janiszewska¹, Rafał Kozdrach¹, Paweł Radulski¹,
Maciej Dębowski², Paweł Parzuchowski²**

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny

*paulina.rajewska@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Morfologia membran otrzymywanych metodą inwersji faz (NIPS) kształtuje się w pierwszych sekundach kontaktu filmu polimerowego z kąpielą koagulacyjną i zależy od konkurencji między transportem nierozpuszczalnika a oporem stawianym mu przez roztwór o rosnącym stężeniu polimeru [1]. Jednym z parametrów opisujących ten opór jest lepkość roztworu membranotwórczego. Celem badań było określenie zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi roztworów modyfikowanego poli(tereftalanu etylenu) (PET), składem układu rozpuszczalnikowego oraz morfologią materiałów otrzymywanych metodą NIPS.

Materiał membranotwórczy otrzymano w wyniku chemicznej modyfikacji PET obejmującej glikolizę 1,6-heksanodiolem, a następnie transestryfikację i polikondensację z oligowęglanem heksametylenu. Wprowadzenie segmentów alifatycznych miało na celu ograniczenie regularności struktury polimeru i jego zdolności do krystalizacji, umożliwiając zastosowanie alternatywnych układów rozpuszczalnikowych o mniejszej uciążliwości dla środowiska [2]. Roztwory membranotwórcze przygotowano przez rozpuszczenie zmodyfikowanego polimeru w trzech dwuskładnikowych układach rozpuszczalnikowych: tetrahydrofuran (THF)–dimetyloformamid (DMF), THF–Cyrene™ oraz DMF–Cyrene™, z dodatkiem glikolu polietylenowego (PEG 400) jako czynnika porotwórczego. Charakterystykę płynięcia wykonano na reometrze rotacyjnym o geometrii stożek–płytką w temperaturze 60°C, a morfologię przekrojów membran formowanych w wodnej kąpeli koagulacyjnej analizowano metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

Wszystkie badane roztwory zachowywały charakter zbliżony do newtonowskiego, przy czym sam dobór układu rozpuszczalnikowego pozwolił uzyskać niemal trzykrotne zróżnicowanie ich lepkości. Otrzymane materiały wykazywały przede wszystkim strukturę gąbczastą, wskazującą na dominację opóźnionego



mechanizmu inwersji niezależnie od początkowej lepkości roztworu. Wyniki potwierdzają, że ostateczna morfologia materiału jest efektem współdziałania reologii roztworu, właściwości rozpuszczalników oraz kinetyki wymiany masy, a lepkość nie jest parametrem wystarczającym do jednoznacznego przewidywania struktury. Zastosowanie Cyrene™ umożliwia modyfikację właściwości reologicznych roztworów i stanowi interesującą alternatywę dla klasycznych rozpuszczalników.

Słowa kluczowe: modyfikowany PET, mokra inwersja faz, lepkość roztworów membranotwórczych.

Literatura

- [1] Mousavi S.M., Raveshiyan S., Amini Y., Zadhoush A., A critical review with emphasis on the rheological behavior and properties of polymer solutions and their role in membrane formation, morphology, and performance, *Advances in Colloid and Interface Science* 319 (2023) 102986. DOI: 10.1016/j.cis.2023.102986
- [2] Kirshanov K., Toms R., Aliev G., Naumova A., Melnikov P., Gervald A., Recent Developments and Perspectives of Recycled Poly(ethylene terephthalate)-Based Membranes: A Review, *Membranes* 12 (2022) 1105. DOI: 10.3390/membranes12111105.
- [3] Marino T., Galiano F., Molino A., Figoli A., New frontiers in sustainable membrane preparation: Cyrene™ as green bioderived solvent, *Journal of Membrane Science* 580 (2019) 224–234. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.03.034.



Kowalencyjne sieci organiczne zawierające triazyny do odzysku metali ze zużytych baterii

Paweł Ratajczak*, Anna Siekierka

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

*pawel.ratajczak@pwr.edu.pl

Streszczenie: Kowalencyjne Sieci Organiczne (ang. *Covalent Organic Frameworks*, COFs) są innowacyjną klasą krystalicznych, porowatych materiałów, w których organiczne elementy budulcowe są połączone silnymi wiązaniami kowalencyjnymi. W rezultacie powstają wysoce uporządkowane struktury, których właściwości można projektować z wyprzedzeniem [1, 2]. Rosnąca produkcja baterii wykorzystywanych w urządzeniach przenośnych i pojazdach elektrycznych stwarza nowe zagrożenia i wyzwania związane ze zrównoważonym rozwojem oraz ochroną środowiska [3]. W związku z tym recykling zużytych baterii staje się coraz ważniejszy i bardziej wartościowy. Rola COFs w tej dziedzinie jest nowym i obiecującym kierunkiem badań ze względu na unikalne właściwości tych materiałów. COFs mogą być zastosowane w procesie recyklingu, potencjalnie wspomagając selektywną ekstrakcję i odzysk cennych metali, takich jak kobalt (Co), nikiel (Ni), mangan (Mn) i lit (Li), które są typowymi składnikami baterii. Celem przeprowadzonego eksperymentu było zbadanie możliwości wykorzystania elektrod wytworzonych z COFs z posiadającymi w swojej strukturze triazynami do separacji jonów metali za pomocą procesu pojemnościowej dejonizacji (ang. *Capacitive Deionization*, CDI). W wyniku syntezy pomiędzy kwasem 2,5-Dihydroksytereftalowym a melminą metodą solwotermalną i mikrofalową otrzymano materiał COF. Wytworzoną z niego elektrodę zastosowano do procesu CDI. Dla materiału wykonano badania woltamperometrii cyklicznej, elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej oraz SEM i FTIR. Przeprowadzone badania wskazują na to, że COFs mogą być zastosowane jako materiał do odzyskiwania jonów metali. Dla materiału uzyskanego metodą solwotermalną uzyskano SAC (ang. *Salt Adsorption Capacity*) 16,2 mg/g. Dotychczasowe badania wskazują, że dzięki zastosowaniu odpowiednio zaprojektowanych warunków procesowych możliwy jest odzysk jonów kobaltu, manganu, niklu lub litu z roztworów wodnych w sposób selektywny.



Słowa kluczowe: Kowalencyjne Sieci Organiczne [*Covalent Organic Frameworks*, COFs,]; Pojemnościowa dejonizacja [*Capacitive Deionization* CDI]; recykling baterii.

Podziękowanie: Badania te zostały w całości sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki, Polska, Sonata 2022/47/D/ST5/00298. This research was funded as a whole by the National Science Centre, Poland, Sonata 2022/47/D/ST5/00298.

Literatura

- [1] Z. Ajmal et al, *Materials Today Chemistry*, Volume 39 (2024), 102140.
- [2] S. Ge et al, *Chemical Society Reviews*, Volume 53, Issue 23, (2024), 11259-11302.
- [3] B. Biswal et al, *Chemical Society Reviews*, Volume 53, Issue 11, (2024) 5552–5592.



Modułowy układ wstępnego oczyszczania i separacji membranowej na potrzeby zrównoważonego odzysku surowców krytycznych

**Maciej Życki^{1,2*}, Bartłomiej Pawłowski¹, Bernadetta Kaźmierczak¹,
Anna Kowalik-Klimczak¹**

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji

²Politechnika Łódzka, Instytut Włókiennictwa

*maciej.zycki@itee.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Zapewnienie stabilnych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych i strategicznych wymaga zwiększenia udziału surowców wtórnych oraz rozwoju technologii umożliwiających ich odzysk ze strumieni odpadowych. Szczególną grupę potencjalnych źródeł wtórnych stanowią ciecze technologiczne powstające m.in. w procesach obróbki powierzchniowej, hydrometalurgii, przemyśle metalowym oraz recyklingu materiałów. Składniki surowcowe mogą występować w nich w postaci zawiesin, cząstek koloidalnych, osadów, kompleksów makrocząsteczkowych lub jonów rozpuszczonych. Z tego względu przygotowanie cieczy do procesów odzysku wymaga zastosowania wielostopniowych układów separacyjnych, dostosowanych do właściwości fizykochemicznych oraz specyfikacji odzyskiwanych składników [1–3].

Procesy membranowe, w tym mikrofiltracja (MF) i ultrafiltracja (UF), mogą być wykorzystywane do oczyszczania, frakcjonowania oraz zatężania wybranych składników cieczy technologicznych. MF umożliwia przede wszystkim usuwanie zawiesin i większych cząstek koloidalnych, natomiast UF pozwala na rozdzielanie drobniejszych koloidów, makrocząsteczek oraz związanych z nimi składników nieorganicznych. Badania prowadzone w skali laboratoryjnej i pilotażowej wskazują, że połączenie filtracji wstępnej z procesami MF i UF ogranicza obciążenie membran substancjami zawieszonymi, stabilizuje warunki procesu oraz umożliwia otrzymywanie rozdzielonych strumieni permeatu i retentatu przeznaczonych do dalszego oczyszczania lub odzysku materiałowego [2–5].

Celem przedstawionych prac jest opracowanie i budowa modułowego systemu badawczego przeznaczonego do oczyszczania cieczy technologicznych oraz do oceny możliwości wydzielania i koncentracji składników zawierających surowce



krytyczne i strategiczne. System składa się z dwóch współpracujących instalacji. Pierwsza obejmuje zbiornik pełniący funkcję odstoju, filtr workowy oraz zestaw trzech filtrów świecowych, umożliwiających stopniowe usuwanie osadów i zanieczyszczeń zawieszonych. Drugą część stanowi instalacja membranowa wyposażona w dwa moduły z membranami zwojowymi, przystosowane do prowadzenia procesów MF i UF. Zastosowana konfiguracja pozwala na realizację dwóch odrębnych procesów membranowych z wykorzystaniem jednej instalacji oraz na elastyczne tworzenie wielostopniowych układów separacyjnych.

Budowana infrastruktura umożliwi ocenę retencji składników, wydajności permeatu i podatności membran na zanieczyszczanie, a także określanie stopnia zażycia składników surowcowych w retentacie. System będzie stanowił platformę do opracowywania procesów odzysku dostosowanych do zróżnicowanych strumieni przemysłowych.

Słowa kluczowe: surowce strategiczne, ciecze technologiczne, techniki membranowe, filtracja wstępna, odzysk surowców.

Podziękowanie: Praca powstała w ramach projektu „Wzmocnienie kompetencji w obszarze recyklingu odpadów surowcowych pod kątem odzysku materiałów krytycznych i strategicznych przez rozbudowę infrastruktury badawczej” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Funduszu Europejskiego dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 (umowa nr FENG.02.04-IP.04-0003/25-00).

Literatura:

- [1] European Commission. European Critical Raw Materials Act, 2024. Available online: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en [accessed on 22 July 2026].
- [2] Katsou, E.; Malamis, S.; Haralambous, K.J. *Water Environment Research* 2011, 83, 298–312. <https://doi.org/10.2175/106143010X12681059117256>
- [3] Ali, A.; Nymann, M.C.; Christensen, M.L.; Quist-Jensen, C. *Membranes* 2020, 10, 85. <https://doi.org/10.3390/membranes10050085>
- [4] Thuvander, J.; Lipnizki, F.; Jönsson, A.-S. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 2019, 39, 214–223. <https://doi.org/10.1080/02773813.2019.1565865>
- [5] Biały, W.; Stangierski, J.; Konieczny, P. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2015, 12, 1875–1888. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0557-4>

Zapraszamy do współpracy

Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji funkcjonujące w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Technologii Eksploatacji posiada unikatową infrastrukturę badawczą, technologiczną i kontrolno-pomiarową, a także kadre specjalistów oraz osiągnięcia naukowe i techniczne, umożliwiające realizację prac B+R w kooperacji z jednostkami naukowymi i instytutami badawczymi oraz przedsiębiorstwami przemysłowymi.

Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji realizuje prace badawczo-rozwojowe i świadczy usługi w obszarze zrównoważonej gospodarki, przede wszystkim w zakresie redukcji uciążliwości ekologicznej procesów technologicznych, ukierunkowanych na wytwarzanie bioproduktów użytkowych, zamykania i integracji obiegów wodnych z możliwością odzysku materiałów, a także wydłużania cyklu życia cieczy eksploatacyjnych.

Zakres działania Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji obejmuje:

1. Opracowywanie systemów gospodarki obiegu zamkniętego, w tym technologii zagospodarowania surowców wtórnych i odpadów oraz zamykania obiegów wody przemysłowej.
2. Badanie i rozwój materiałów kompozytowych, biomateriałów, biodegradowalnych materiałów eksploatacyjnych i płynów technologicznych.
3. Opracowywanie technologii i urządzeń wspomagających proekologiczne procesy przemysłowe.
4. Rozwój systemów technicznych do realizacji procesów biotechnologicznych, w tym wytwarzania i zagospodarowania biomasy.
5. Rozwój procesów oczyszczania cieczy poużytkowych, w tym urządzeń i funkcjonalizowanych materiałów filtracyjnych oraz sorpcyjnych.
6. Realizacja działalności usługowej dla sektora przemysłu i nauki, a także współpraca B+R z przemysłem.

Kontakt

dr inż. Anna Kowalik-Klimczak
Dyrektor Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji
anna.kowalik-klimczak@itee.lukasiewicz.gov.pl

tel. [+48] 48 364-42-41 wew. 218
kom. 601 263 460





**Fundusze
Europejskie**

Wzmocnienie kompetencji w obszarze recyklingu odpadów surowcowych

pod kątem odzysku materiałów
krytycznych i strategicznych przez
rozbudowę infrastruktury badawczej

www.mapadotacji.gov.pl

Cel projektu

Rozszerzenie potencjału badawczego konsorcjantów i zwiększenie zakresu oferowanych badań w obszarze kompleksowych, interdyscyplinarnych prac nad odzyskiem materiałów krytycznych i strategicznych z odpadów. Realizacja wymaga działań inwestycyjnych w infrastrukturę badawczą.

Zakres projektu

- wytworzenie wyspecjalizowanej infrastruktury badawczej
- zakup nowoczesnej aparatury analitycznej
- rozwój technologii recyklingu odpadów umożliwiających odzysk materiałów krytycznych i strategicznych
- rozszerzenie kompetencji kadry naukowej w zakresie komercjalizacji wyników prac B+R

Efekty projektu

- rozwój potencjału badawczego w zakresie odzysku materiałów krytycznych i strategicznych
- rozszerzenie oferty usług badawczych i analitycznych dla przemysłu
- rozwój nowych kierunków interdyscyplinarnych badań zgodnych z gospodarką o obiegu zamkniętym
- wiedza oraz dorobek publikacyjny i patentowy kadry naukowej

Projekt ReMAT realizowany w konsorcjum:



Całkowite dofinansowanie: 47 517 120,32 PLN

Dofinansowanie Ł-ITEE: 13 382 714,75 PLN

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Funduszu Europejskiego dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027.

#FunduszeEuropejskie #FunduszeUE



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



