

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej
Polskie Towarzystwo Chemiczne

POSTĘPY W TECHNOLOGII I INŻYNIERII CHEMICZNEJ 2022

Praca zbiorowa pod redakcją
Zofii Lendzion-Bieluń i Dariusza Moszyńskiego



Szczecin 2022

Recenzenci

dr inż. Marcin Bartkowiak, dr inż. Małgorzata Dziecioł, dr hab. inż. Elżbieta Gabruś, prof. dr hab. Marek Gryta, dr hab. inż. Joanna Grzechulska, dr hab. inż. Ewa Janus, dr hab. inż. Marian Kordas, dr hab. inż. Agnieszka Kowalczyk, dr inż. Łukasz Kucharski, dr hab. inż. Ewelina Kusiak-Nejman, prof. dr hab. Urszula Narkiewicz, dr inż. Paula Ossowicz-Rupniewska, dr hab. inż. Rafał Pelka, dr hab. inż. Iwona Petech, dr hab. inż. Beata Schmid, dr hab. inż. Jacek Soroka, dr hab. inż. Anna Tabero, dr hab. inż. Jolanta Szoplik, dr inż. Aneta Wesołowska, prof. dr hab. inż. Agnieszka Wróblewska, dr hab. inż. Elwira Wróblewska, dr hab. inż. Magdalena Zdanowicz

Opracowanie redakcyjne
Wojciech Markowski

Skład komputerowy
Waldemar Jachimczak

W monografii opublikowano oryginalne prace naukowo-badawcze niepublikowane wcześniej w innych czasopiśmie ani materiałach konferencyjnych, kongresach, sympozjach, ani nieprzekazane do publikacji. Nadesłanie pracy do Wydawcy uważa się za jednoznaczne z oświadczeniem Autora, że warunek jest spełniony.

Wydano za zgodą
Rektora Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

ISBN 978-83-7663-352-7

Wydawnictwo Uczelniane
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
al. Piastów 48, 70-311 Szczecin
tel. 91 449 47 60
e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

BADANIE ZMIAN POTENCJAŁU ZETA MEMBRAN ULTRAFILTRACYJNYCH W PROCESIE OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW Z MYJNI SAMOCHODOWEJ

Piotr WOŹNIAK

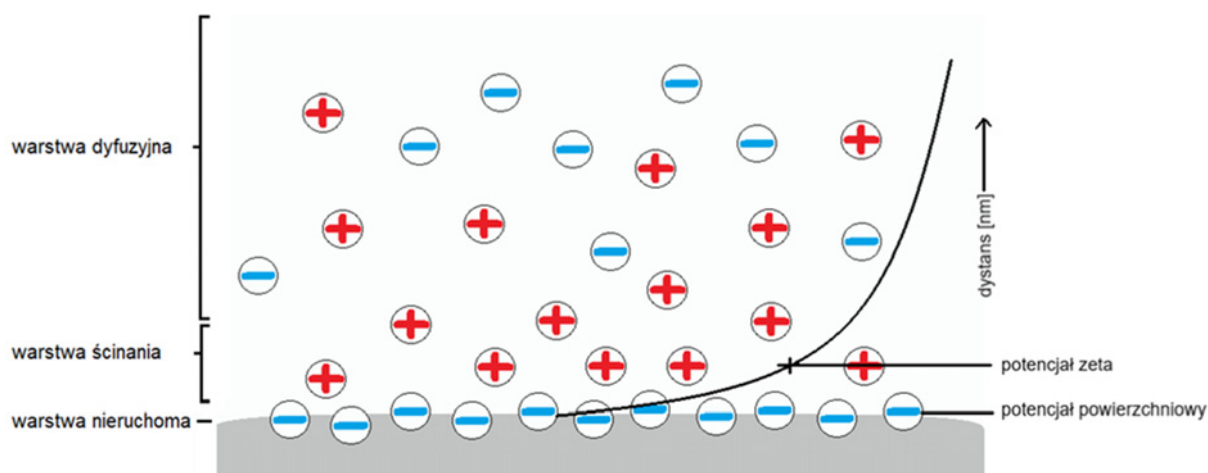
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej,
Katedra Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska

WSTĘP

Myjnie samochodowe to rodzaj działalności, w której zużywa się duże ilości czystej wody i odprowadza do środowiska ścieki zawierające szkodliwe chemikalia. Ilość wody potrzebnej do umycia każdego samochodu w zależności od jego rodzaju szacuje się na 150–600 l [1, 2]. Zanieczyszczenie ścieków spowodowane jest trzema źródłami: środkami chemicznymi stosowanymi w myjni samochodowej, eksploatacją samochodów oraz zanieczyszczeniami komunikacyjnymi, takimi jak zanieczyszczenia nawierzchni drogowych, kurz, piasek, sól i drobne cząstki spalin [1]. Obecnie do separacji tych zanieczyszczeń powszechnie stosuje się następujące procesy: filtrację piaskową, elektrokoagulację, koagulację chemiczną, ozonowanie oraz metody biologiczne [3]. Jednak wymienione powyżej tradycyjne metody są często nieskuteczne. Z tego powodu procesy membranowe takie jak ultrafiltracja (UF), mikrofiltracja (MF) i nanofiltracja (NF) zyskały duże zainteresowanie jako doskonalsze metody usuwania zanieczyszczeń ze ścieków powstających w myjniach samochodowych [4].

Wykorzystanie technologii membranowej jest znacznie ograniczane przez zanieczyszczenie membran (fouling), które powoduje zmniejszenie wydajności i wzrost kosztów operacyjnych. Redukcję zjawiska foulingu można osiągnąć za pomocą następujących metod: wstępnego oczyszczania ścieków, modyfikacji membrany oraz monitorowania i czyszczenia membran [5]. Zanieczyszczenie membrany występuje, gdy cząstki osadzają się na jej powierzchni lub w porach, zmniejszając wydajność i wpływając na selektywność, jak również na przepływ permeatu przez pory. W celu utrzymania wydajności membrany często wymagane jest wstępne uzdatnianie wody zasilającej i chemiczne czyszczenie membrany. W przypadku nieodwracalnego zanieczyszczenia lub degradacji po agresywnym czyszczeniu membrany muszą być wymieniane, co dodatkowo zwiększa koszty operacyjne. W związku z tym wymagane są szeroko zakrojone badania dotyczące scharakteryzowania i optymalizacji powierzchni membran w celu zapobiegania ich zanieczyszczeniu. Membrany są często produkowane z polimerów hydrofobowych, takich jak fluorek poliwinylidenu (PVDF) lub polieterosulfon (PES). Takie membrany są trwałe, ale ze względu na oddziaływania hydrofobowe adsorbują na powierzchni różne zanieczyszczenia. Aby temu zapobiec, stosuje się hydrofilizację membran [6], jednak również hydrofilizowana membrana może ulec zanieczyszczeniu. Przyczyną powstawania zanieczyszczeń mogą być oddziaływania elektrostatyczne między membraną a składnikami zanieczyszczającymi. Roztwory zasilające są zazwyczaj złożonymi mieszaninami zawierającymi szeroką gamę substancji przenoszących ładunek, w tym surfaktanty, makrocząsteczki (np. białka, polisacharydy i kwasy nukleinowe), jony, polielektrolity [7]. Interakcje między tymi substancjami a powierzchnią membrany mogą znacząco zmienić ładunek powierzchniowy membrany, co wynika z oddziaływań między ładunkami na powierzchni membrany a naładowanymi substancjami rozpuszczonymi [8]. Ładunek powierzchni membrany ma znaczący wpływ na właściwości separacyjne membrany, charakter i zakres zanieczyszczenia, a także polaryzację stężenia.

Układ naładowanych cząstek w bliskiej odległości od powierzchni membrany określany jest jako podwójna warstwa elektryczna (EDL) [7]. Ładunek w EDL jest najbardziej skoncentrowany w pobliżu powierzchni membrany i zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości od niej (rys. 1), co odzwierciedla



Rys. 1. Model elektrochemicznej warstwy podwójnej na granicy fazy ciało stałe–ciecz

stały spadek potencjału [9]. Jony blisko powierzchni membrany znajdują się w nieruchomej warstwie Sterna, w której rozkład ładunku i potencjału elektrycznego determinują oddziaływania między jonami, dipolami i powierzchnią membrany. Za warstwą Sterna i oddzieloną od niej płaszczyzną ścinania znajduje się rozproszona warstwa Gouya–Chapmana (warstwa dyfuzyjna), w której jony mogą swobodnie poruszać się dzięki ruchowi napędzanemu termicznie [7, 9]. Pomiedzy warstwą adsorpcyjną a dyfuzyjną występuje potencjał elektrokinetyczny nazywany potencjałem zeta. Jako graniczną wartość określającą stabilność dyspersji przyjmuje się ok. ± 30 mV [8].

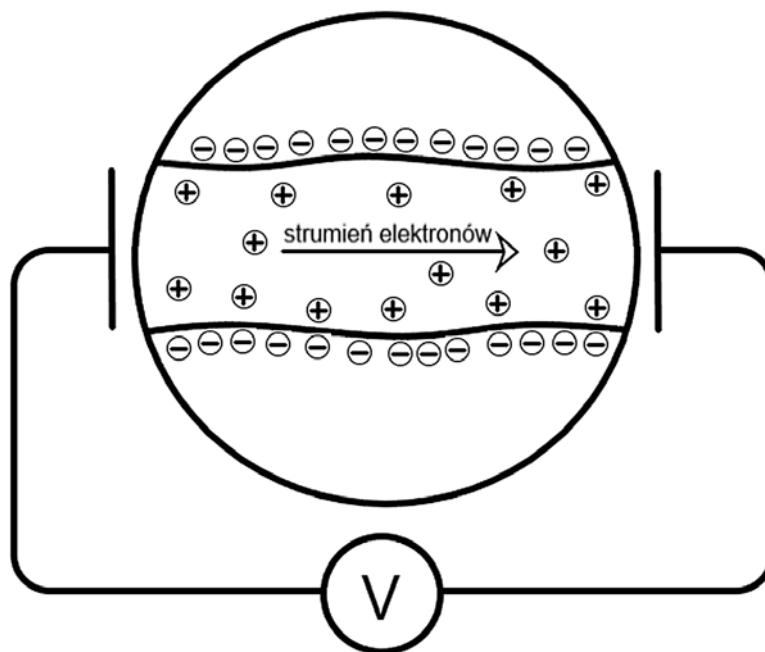
Badanie potencjału elektrycznego membran jest bardzo użytecznym narzędziem, pomagającym w odpowiedniej interpretacji i przewidywaniu ich właściwości filtracyjnych, szczególnie w odniesieniu do zanieczyszczeń. Powszechne sposoby charakteryzowania interakcji substancja rozpuszczona–membrana na granicy fazy ciało stałe–roztwór wymagają wcześniejszej wiedzy o potencjale zeta [7, 10, 11]. Jest to potencjał elektryczny warstwy podwójnej występującej przy powierzchni ciała stałego lub innych cząsteczek rozproszonych w kontakcie z roztworem elektrolitu. Potencjał zeta można wyznaczyć za pomocą pomiaru prędkości naładowanych cząstek poruszających się w kierunku elektrody przez roztwór w obecności zewnętrznego pola elektrycznego [12, 13]. Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na potencjał zeta są pH oraz siła jonowa i stężenie substancji w roztworze. Badanie ładunku powierzchniowego w funkcji pH ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia właściwości kwasowo-zasadowych grup funkcyjnych powierzchni błony [14]. Ponieważ aniony są adsorbowane łatwiej niż kationy, w środowisku zasadowym ładunek powierzchni jest zwykle ujemny. W przypadku braku specyficznej adsorpcji w warstwie Sterna jonami determinującymi potencjał są zdysocjowane cząsteczki wody [15]. Ładunek i wynikający z niego potencjał zeta membrany zależą od pH, ponieważ grupy funkcyjne membrany różnie protonują i deprotonują w zakresie pH [16]. Powierzchnie w kontakcie z wodą uzyskują ładunek powierzchniowy oparty na dwóch mechanizmach: reakcji chemicznych (często reakcjach kwasowo-zasadowych) lub adsorpcji jonów. Reakcje chemiczne mogą np. zmienić grupy powierzchniowe $-OH$ w grupy $-OH_2^+$ w zależności od pH [17, 18]. Ładunek membrany jest istotny dla wydajności membrany, ponieważ wpływa na odpychanie elektrostatyczne między jonami lub naładowanymi cząsteczkami a jej powierzchnią [19]. Dodatkowo ze względu na dysocjację grup funkcyjnych na powierzchni membran wartość pH układu może wpływać na przepuszczalność membrany. Wartość pH może również wpływać na właściwości cząsteczek w roztworze poddawanych oczyszczaniu. Na przykład przy niskim pH humusowe grupy funkcyjne będą protonować, a przy wysokim pH – deprotonować. To z kolei będzie odgrywać rolę w interakcji między cząsteczkami humusu a membraną [20]. Dogłębne zrozumienie wzajemnych powiązań między wydajnością membran a ich właściwościami chemicznymi ma ogromne znaczenie w badaniach nad membranami.

Wraz ze wzrostem siły jonowej podwójna warstwa elektryczna staje się bardziej skompresowana, podczas gdy potencjał zeta maleje, i na odwrót. Wartościowość jonów jest również ważna przy pomiarze potencjału. Dla jonów o wyższej wartościowości np. Ca^{2+} , Al^{3+} podwójna warstwa elektryczna staje się bardziej zwarta, a potencjał się zmniejsza [19, 21].

Zależność między potencjałem zeta a stężeniem cząstek jest złożona i zwykle zależy od adsorpcji powierzchniowej i wpływu EDL. Można jednak stwierdzić, że w warunkach rozcieńczonych dominuje zjawisko adsorpcji powierzchniowej, a co za tym idzie – potencjał wzrasta wraz ze stężeniem. Jednak przy wyższym zakresie stężeń dominuje wpływ grubości EDL, a następnie wraz ze wzrostem stężenia obserwuje się efekt odwrotny, tj. spadek potencjału przy mniejszej stabilności dyspersji [19, 22].

Oprócz wartości potencjału zeta w roztworze wodnym w określonym zakresie pH istotnym parametrem do analizy jest punkt izoelektryczny (IEP). Jest to wartość pH, przy której potencjał zeta wynosi 0 mV i następuje odwrócenie ładunku na powierzchni. Jest wrażliwy na modyfikacje powierzchni i daje wskazówki na temat istoty zmiany chemii powierzchni [15, 23].

Gdy płyn zawierający naładowane cząsteczki jonowe może przepływać przez naładowaną kapilarę lub membranę z powodu gradientu ciśnienia, wówczas różnica potencjałów mierzona przy zerowym prądzie jest potencjałem przepływu [24]. Potencjał przepływu zależy od szeregu właściwości roztworu, w tym potencjału zeta, lepkości, szybkości dyfundujących jonów i stałej dielektrycznej. W przypadku pomiarów potencjału strumieniowego można wygenerować na dwa sposoby. W pierwszej metodzie roztwór elektrolitu zostaje przefiltrowany przez materiał porowaty w celu pomiaru potencjału przepływu poprzecznego. Tutaj mierzona jest podwójna warstwa elektryczna w porach, z błędami wynikającymi z nakładania się warstwy podwójnej z przeciwnych stron porów. W drugiej metodzie elektrolit przepływa przez wąski kanał utworzony z membrany umieszczonej pomiędzy dwiema płytami z przepływem przez powierzchnię membrany, umożliwiając pomiar stycznego potencjału przepływu. Kiedy roztwory elektrolitu są pompowane przez materiał porowaty, kapilarę lub jakkolwiek wąski kanał, generowany jest potencjał przepływu. Roztwór w porach lub kanale niesie ładunek netto, gdy więc płynie, generuje prąd strumieniowy, co powoduje powstanie różnicy potencjałów, co z kolei przeciwdziała ruchowi jonów (rys. 2). Dzieje się tak, ponieważ w miarę gromadzenia się ładunków przeciwnych w kierunku



Rys. 2. Schemat potencjału przepływowego, przepływ elektrolitu w kanale pomiędzy membranami

przepływu powstaje potencjał przepływu [16, 20]. W stanie równowagi prąd upływu i prąd strumienia są równe co do wielkości. Zmierzona różnica potencjałów na błonie lub kapilarze w tym momencie jest potencjałem przepływu. Stąd ładunek na powierzchni jest powiązany z potencjałem przepływu i przyłożoną różnicą ciśnień [25, 26]. W przypadku pomiarów potencjału przepływu stycznego przepływ elektrolitu odbywa się wzdłuż powierzchni membrany, a nie przez pory membrany. Kanał przepływowy jest zwykle utworzony przez dwie identyczne powierzchnie membrany zwrócone do siebie i znajdujące się w niewielkiej odległości. Pomiary styczne przewyższają kilka niedociągnięć w technice potencjału strumienia poprzecznego. Podstawową zaletą jest to, że szerokość kanału jest ustalana przez przyrząd, a nie materiał, więc nie ma problemu z unieważnieniem równania Helmholtza–Smoluchowskiego ze względu na nakładanie się podwójnych warstw. Umożliwia to również pomiar materiałów o bardzo małych porach, a także usunięcie problemów związanych z dużym spadkiem ciśnienia i odrzucaniem form jonowych przez takie membrany. Ponieważ przepływ odbywa się wzdłuż powierzchni membrany, a nie przez materiał, stąd udział porów, wielowarstwowość itp. są ignorowane i mierzony jest tylko potencjał zeta najwyższej części powierzchni membrany. W związku z tym technika ta jest znacznie częściej stosowana w porównaniu z pomiarami potencjału przepływu poprzecznego [7].

Równanie stosowane do obliczania potencjału zeta z wykorzystaniem danych prądu strumieniowego wymaga dokładnej znajomości długości i przekroju kanału strumieniowego, czyli wielkości próbki stałej:

$$\zeta = \frac{dl_{str}}{d\Delta p} \times \frac{\eta}{\varepsilon \times \varepsilon_0} \times \frac{L}{A} \quad (1)$$

gdzie: dl/dp – nachylenie prądu strumienia w funkcji różnicy ciśnień, η – lepkość elektrolitu, ε – współczynnik dielektryczny elektrolitu, ε_0 – przenikalność elektryczna, L – długość kanału strumienia, A – przekrój kanału strumienia.

Dla typów próbek, w których geometria kanału strumieniowego jest nieznana (np. płaskie ciała stałe o nieregularnych rozmiarach, włókna, tekstylia i próbki ziarniste), ma zastosowanie pochodna równania Helmholtza–Smoluchowskiego (2). To równanie wykorzystuje dane dotyczące potencjału strumienia w połączeniu z przewodnością elektrolitu:

$$\zeta = \frac{dU_{str}}{d\Delta p} \times \frac{\eta}{\varepsilon \times \varepsilon_0} \times \kappa_B \quad (2)$$

gdzie: dU/dp – nachylenie potencjału przepływu w funkcji różnicy ciśnień, κ_B – przewodność elektrolitu.

Celem pracy było zbadanie wydajności membran ultrafiltracyjnych w usuwaniu środków stosowanych do mycia samochodów w myjni samochodowej oraz ich wpływu na ładunek powierzchniowy membrany. Przedstawiono mechanizmy wyjaśniające zachowanie strumienia podczas procesu ultrafiltracji tych roztworów.

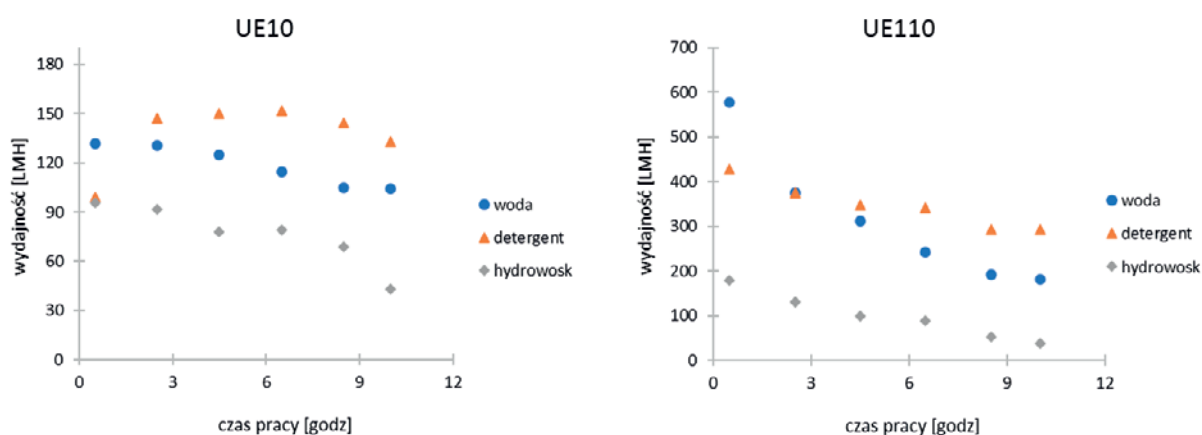
MATERIAŁY I METODY

Potencjały zeta membrany mierzono za pomocą pomiarów potencjału strumieniowego przeprowadzonych w systemie SurPASS (Anton Paar, Graz, Austria). Pomiary potencjału zeta przeprowadzono w zakresie pH 2–8, wykonując trzy powtórzenia dla każdego punktu pomiarowego. Punkt pomiarowy wyznaczany był automatycznie przez program zmieniający wartość pH co 0,3. Wykorzystano dwie

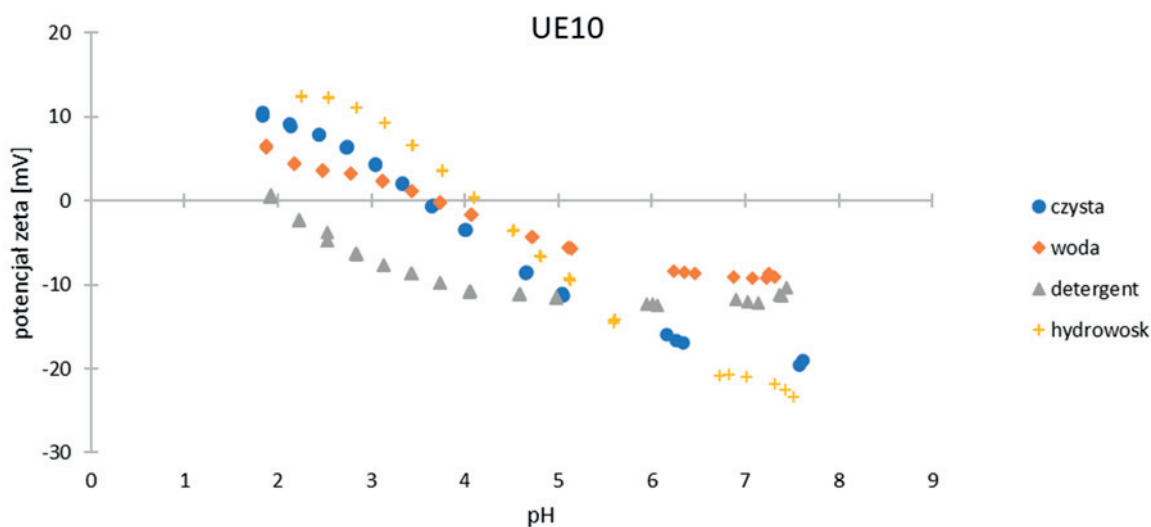
membrany z polieterosulfonu (PES) o różnych średnicach porów UE10 (10 kDa) oraz UE110 (110 kDa). Proces ultrafiltracji przeprowadzono pod ciśnieniem 2 bar przy przepływie nadawy 1,6 m/s. Przeprowadzono 10-godzinny proces z wykorzystaniem detergentu (Turbo Foam) i hydrowosku stosowanych do mycia samochodów w rozcieńczeniu 0,5% ze skoncentrowanego płynu (rozcieńczono według zaleceń producenta do stosowania w myjni samochodowej).

WYNIKI

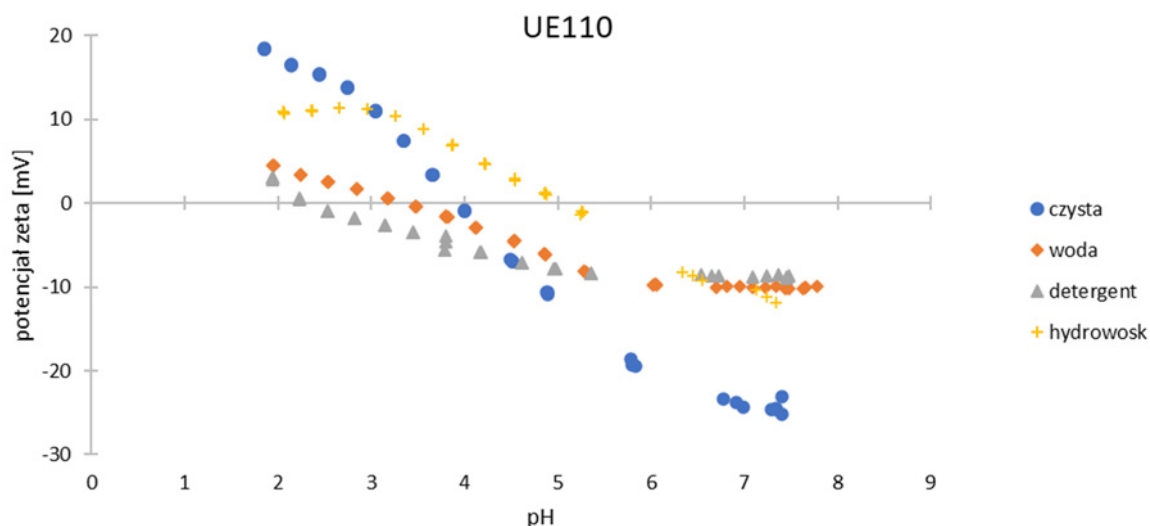
Aby zbadać wpływ adsorpcji detergentów i hydrowosku na zmiany ładunku powierzchniowego membran, do pomiarów potencjału zeta zastosowano membrany po 10-godzinnym procesie ultrafiltracji tych środków oraz porównano z nieużywanymi membranami. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki uzyskane podczas procesu UF przy różnicy ciśnień 2 atm i prędkości przepływu ok. 1,6 m/s. Obserwowany spadek wydajności dla wody wynikał z kompresji membran oraz odkładania się na nich zanieczyszczeń wymywanych ze ścianek instalacji. Największy wpływ na spadek strumienia podczas ultrafiltracji środków do mycia samochodu ma hydrowosk, którego adsorpcja na powierzchni membrany spowodowała spadek wydajności procesu o 90% dla membrany UE110 oraz 60% dla membrany UE10.



Rys. 3. Wpływ środków do mycia samochodów na spadek strumienia permeatu



Rys. 4. Zależność potencjału zeta od wartości pH dla membrany UE10



Rys. 5. Zależność potencjału zeta od wartości pH dla membrany UE110

Tabela 1. Wpływ detergentu i wosku na przesunięcie punktu izoelektrycznego membran

Membrana	Czysta	Woda	Detergent	Hydrowosk
UE10	3,57	3,69	1,97	4,15
UE110	3,92	3,35	2,34	7,66

Zwykle skuteczność procedury czyszczenia ocenia się tylko na podstawie pomiarów wydajności strumienia. Nie daje to jednak żadnych informacji o właściwościach powierzchni membrany. Pomiar potencjału zeta membrany są w stanie dostarczyć dodatkowych przydatnych informacji na temat stanu jej powierzchni i są wykonywane przy różnej wartości pH (rys. 4 i 5). Przy pH niższym niż punkt izoelektryczny powierzchnia membrany ma pozorny ładunek dodatni z powodu adsorpcji jonów H^+ , podczas gdy przy wysokim pH zachodzi adsorpcja OH^- . W pH obojętnym membrany wykonane z pochodnych kwasu sulfonowego mają ładunek ujemny. Porównując czystą membranę z membraną po procesie UF przeprowadzonym dla destylowanej wody, zauważamy różnicę w przebiegu krzywej, jednak nie ma wyraźnej zmiany w wartości punktu izoelektrycznego, z czego można wnioskować, że zmiana ta wynika z zabrudzenia powierzchni membrany zanieczyszczeniami z instalacji, a nie ze zmiany właściwości powierzchni membran.

W przeprowadzonym badaniu dla obydwu membran obserwujemy ten sam trend zmiany ładunku w zależności od zastosowanego płynu (tabela 1). W przypadku wosku obserwujemy wzrost potencjału elektrycznego na powierzchni membrany w porównaniu z czystą membraną (rys. 3 i 4). Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku detergentów, które w zakresie pH poniżej 5 znacząco zwiększają ładunek na powierzchni, co ma odzwierciedlenie w wydajności filtracji tych płynów. Wysoce ujemny ładunek membrany może przyciągać i wiązać się z dodatnimi składnikami nadawy, takimi jak jony dwuwartościowe (np. wapń i magnez), powodując odkładanie się osadu na powierzchni membrany i spadek strumienia permeatu.

Wpływ detergentów na potencjał elektryczny membrany sprawia, że pod wpływem ujemnie naładowanych grup funkcyjnych cząsteczek środka powierzchniowo czynnego membrana staje się bardziej naładowana ujemnie (rys. 3 i 4). Przy wysokim pH oddziaływania hydrofobowe między cząsteczkami detergentu a ujemnie naładowaną powierzchnią membrany skutkują znaczną adsorpcją detergentu i bardziej ujemnym potencjałem membrany. Przy niskim pH przyciąganie elektrostatyczne i możliwe asocjacje środka powierzchniowo czynnego na powierzchni membrany mają jeszcze większy wpływ

na potencjał zeta. Dla membran po procesie UF z wykorzystaniem detergentu nastąpiło przesunięcie punktu izoelektrycznego do niższej wartości pH, dla UE10 z 3,57 do 1,97 i dla UE110 z 3,92 do 2,34 (tabela 1). Zwiększenie ładunku ujemnego na powierzchni poprawiło właściwości hydrofilowe membran, co było widoczne pod postacią większej wartości strumienia w porównaniu z czystą wodą. Dla membran po procesie UF z wykorzystaniem hydrowosku obserwujemy przesunięcie punktu izoelektrycznego do wyższej wartości pH w porównaniu z czystą membraną, zwłaszcza dla membrany UE110, gdzie ten punkt ustalony został dla pH 7,66 i gdzie spowodowało to spadek wydajności o 90%. Dla UE10 punkt izoelektryczny wyznaczono dla pH 4,15, a spadek wydajności wyniósł 60%.

WNIOSKI

1. Dane dotyczące potencjału zeta czystych i zabrudzonych membran pokazują, że jest on zmieniany przez adsorpcję środków stosowanych w myjni samochodowej.
2. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że anionowe środki powierzchniowo czynne zawarte w detergentach stosowanych w myjni samochodowej poprawiają właściwości hydrofilowe membran, zwiększając wydajność procesu.
3. Hydrowosk silnie sorbuje na powierzchni membrany, co powoduje spadek wydajności strumienia i zmiany ładunku membrany
4. Membrany o mniejszej średnicy porów (10 kDa) są bardziej odporne na powstawanie zanieczyszczeń na ich powierzchni, co przekłada się na mniejsze spadki wydajności.

PODZIĘKOWANIA

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa” nr projektu NdS/538617/2021/2022 kwota dofinansowania 352135 zł, całkowita wartość projektu 352 135 zł.



LITERATURA

- [1] Uçar D. Membrane processes for the reuse of car washing wastewater. *J. Water Reuse Desalin.* 2017, 8, 169–175.
- [2] Ghaly A.E., Mahmoud N.S., Ibrahim M.M., Mostafa E.A., Abdelrahman E.N., Emam R.H., Kassem M.A., Hatem M.H. Water use, wastewater characteristics, best management practices and reclaimed water criteria in the carwash industry: A review. *Int. J. Bioprocess Biotechnol. Adv.* 2021, 7, 240–261.
- [3] Kiran S.A., Arthanareeswaran G., Lukka Thuyavan Y., Ismail A.F. Influence of bentonite in polymer membranes for effective treatment of car wash effluent to protect the ecosystem. *Ecotox. Environ. Safe.* 2015, 121, 186–192.
- [4] Torkashvand J., Farzadkia M., Younesi S., Gholami M. A systematic review on membrane technology for carwash wastewater treatment: efficiency and limitations. *Desalin. Water Treat.* 2021, 210, 81–90.

- [5] Cheng X.X., Zhou W.W., Wu D.J., Luo C.W., Jia R.B., Li P.J., Zheng L., Zhu X.W., Liang H. Pre-deposition layers for alleviating ultrafiltration membrane fouling by organic matter: role of hexagonally and cubically ordered mesoporous carbons. *Sep. Purif. Technol.* 2020, 240, 116599
- [6] Breite D., Went M., Prager A., Schulze A. The critical zeta potential of polymer membranes: how electrolytes impact membrane fouling. *RSC Adv.* 2016, 6, 98180-98189.
- [7] Johnson D.J., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. State of the art review on membrane surface characterisation: Visualisation, verification and quantification of membrane properties. *Desalination* 2018, 434, 12–36.
- [8] Owczarż P., Ziółkowski P., Dziubiński M. Pomiar potencjału zeta jako metoda wyznaczenia punktu przemiany fazowej zol-żel dla układów chitozanowych. *Inż. Apar. Chem.* 2016, 4, 152–153.
- [9] Oatley-Radcliffe D.L., Aljohani N., Williams P.M., Hilal N. Electrokinetic phenomena for membrane charge. In: Hilal N., Ismail A., Matsuura T., Oatley-Radcliffe D. (eds.). *Membrane characterization*. Elsevier, 2017, 405–422
- [10] Martín A., Martínez F., Malfeito J., Palacio L., Prádanos P., Hernández A. Zeta potential of membranes as a function of pH: Optimization of isoelectric point evaluation. *J. Membr. Sci.* 2003, 213(1-2), 225–230.
- [11] Lettmann C., Möckel D., Staude E. Permeation and tangential flow streaming potential measurements for electrokinetic characterization of track-etched microfiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 1999, 159(1-2), 243–251.
- [12] Cai H., Fan H., Zhao L., Hong H., Shen L., He Y., Chen J. Effects of surface charge on interfacial interactions related to membrane fouling in a submerged membrane bioreactor based on thermodynamic analysis. *J. Colloid Interface Sci.* 2016, 465, 33–41.
- [13] Lu G., Gao P. Emulsions and microemulsions for topical and transdermal drug delivery. In: *Handbook of non-invasive drug delivery systems*. William Andrew Publishing, 2010, 59–94
- [14] Al-Amoudi A., Williams P., Mandale S., Lovitt R.W. Cleaning results of new and fouled nanofiltration membrane characterized by zeta potential and permeability. *Sep. Purif. Technol.* 2007, 54(2), 234–240.
- [15] Pontié M., Chasseray X., Lemordant D., Lainé J.M. The streaming potential method for the characterization of ultrafiltration organic membranes and the control of cleaning treatments. *J. Membr. Sci.* 1997, 129(1), 125–133.
- [16] Möckel D., Staude E., Dal-Cin M., Darcovich K., Guiver M. Tangential flow streaming potential measurements: hydrodynamic cell characterization and zeta potentials of carboxylated polysulfone membranes. *J. Membr. Sci.* 1998, 145(2), 211–222.
- [17] Calvo J.I., Hernández A., Prádanos P., Tejerina F. Charge adsorption and zeta potential in cyclopore membranes. *J. Colloid Interf. Sci.* 1996, 181(2), 399–412.
- [18] Huisman I.H., Prádanos P., Calvo J.I., Hernández A. Electroviscous effects, streaming potential, and zeta potential in polycarbonate track-etched membranes. *J. Membr. Sci.* 2000, 178(1-2), 79–92.
- [19] Bhattacharjee S. DLS and zeta potential—what they are and what they are not? *J. Control. Release.* 2016, 235, 337–351.
- [20] Elimelech M., Chen W.H., Waypa J.J. Measuring the zeta (electrokinetic) potential of reverse osmosis membranes by a streaming potential analyzer. *Desalination* 1994, 95(3), 269–286.
- [21] Chatterji S., Kawamura M. Electrical double layer, ion transport and reactions in hardened cement paste. *Cem. Concr. Res.* 1992, 22, 774–782.
- [22] Nägele E.W. The transient zeta potential of hydrating cement. *Chem. Eng. Sci.* 1989, 44(8), 1637–1645.
- [23] Kirkwood J., Hargreaves D., O’Keefe S., Wilson J. Using isoelectric point to determine the pH for initial protein crystallization trials. *Bioinformatic*, 2015, 31(9), 1444–1451.
- [24] Singh N., Husson S.M., Zdyrko B., Luzinov I. Surface modification of microporous PVDF membranes by ATRP. *J. Membr. Sci.* 2005, 262(1-2), 81–90.
- [25] Lyklema J. *Fundamentals of interface and colloid science: Particulate colloids*. Elsevier, 2005.
- [26] Peeters J.M., Mulder M.H., Strathmann H. Streaming potential measurements as a characterization method for nanofiltration membranes. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 1999, 150(1-3), 247–259.