

Katarzyna Majewska-Nowak, Joanna Kawiecka-Skowron

Skuteczność odsalania roztworów barwników organicznych w procesie elektrodializy

Otrzymywanie i zateżnienie roztworów substancji organicznych pozbawionych soli jest zagadnieniem ważnym nie tylko w technologiach przemysłowych, ale również w inżynierii środowiska. Do tego celu można stosować ciśnieniowe procesy membranowe, chociaż nie są one pozbawione ograniczeń. Ultrafiltracyjne odsalanie roztworów zawierających cząsteczki organiczne jest skuteczne przy ich wymiarach powyżej 10 nm. Przy mniejszych wymiarach cząsteczek trudności polegają na właściwym doborze granicznej rozdzielczości membran (cut-off). Pewnym rozwiązaniem może być diafiltracja, ale konsekwencją jej stosowania są duże ilości ścieków i duże zużycie wody zdemineralizowanej. Z kolei odwrócona osmoza umożliwia zateżnienie roztworów substancji organicznych o mniejszych masach cząsteczkowych, ale wraz z niepożądanymi solami mineralnymi. W przypadku procesu nanofiltracji możliwe jest zateżnienie makrocząsteczek i separacja soli, ale tylko jednowartościowych, gdyż sole dwu- i więcej wartościowe zostaną w zateżnionym roztworze [1].

Skutecznym procesem membranowym, gwarantującym odsolenie roztworów substancji organicznych, może być elektrodializa. W wyniku selektywnej elektromigracji jonów przez membrany jonowymienne otrzymuje się dwa strumienie – roztwór ubogi w jony (diluat) oraz roztwór zateżniony (koncentrat). Wydaje się, że proces elektrodializy może być z powodzeniem stosowany do odsalania wód poprocesowych lub ścieków zawierających substancje organiczne (w tym barwniki). Wyczerpane kąpiele farbiarskie zawierają pozostałości barwników organicznych oraz środki pomocnicze, w tym sole mineralne, przede wszystkim chlorek sodu. Sole mineralne dodaje się w celu zwiększenia sorpcji barwników o małym powinowactwie do barwionego włókna i ich stężenie może dochodzić nawet do 10 g/dm³. Wydaje się możliwe zastosowanie procesu elektrodializy do odsalania wodnych roztworów barwników organicznych, takich jak barwniki kwasowe, zasadowe, bezpośrednio. Wprawdzie barwniki te dysocjują w wodzie, tworząc barwne aniony lub kationy, ale biorąc pod uwagę rozmiary cząsteczek barwników rzędu 1÷10 nm jest mało prawdopodobne, aby mogły one być transportowane przez membrany jonowymienne. Szybkość transportu jonów w procesie elektrodializy zależy głównie od ich rozmiarów

i jony soli mineralnych o przeciętnym promieniu mniejszym od 0,4 nm będą bez problemu transportowane przez membrany jonowymienne. W wyniku takiego procesu powstanie koncentrat zawierający sole mineralne oraz diluat zawierający jedynie rozpuszczone barwniki organiczne. Zastosowanie membran jonoselektywnych, które pokryte są cienką warstwą jonowymienną o znaku przeciwnym do znaku membrany (tzw. membrany monoselektywne), może przyczynić się do zwiększenia skuteczności procesu i zabezpieczenia przed ewentualnym niekontrolowanym transportem cząsteczek barwników organicznych do komór koncentratu.

Idea wykorzystania procesu elektrodializy do odsalania roztworów różnych substancji organicznych pojawiła się już dość dawno w Stanach Zjednoczonych. W opublikowanych wówczas patentach [2,3] podane są liczne przykłady odsalania roztworów zawierających makrocząsteczki obojętne elektrycznie (sacharydy, aminy, związki azowe, związki heterocykliczne, oligomery rozpuszczalne w wodzie) lub jonowe (kwas organiczne, karboksylowe sulfonowe oraz betainy). Jako sole w roztworach substancji organicznych stosowano związki metali alkalicznych lub metali ciężkich, fosforany, azotany, siarczany oraz węglany. Ze względu na niedoskonałość ówczesnych membran jonowymiennych, obserwowano niekontrolowane przenikanie substancji organicznych do koncentratu (zwłaszcza tych o mniejszych masach cząsteczkowych lub o charakterze jonowym), zaś roztwory wyjściowe charakteryzowały się stosunkowo małym stężeniem soli. Mimo wielu wad procesu elektrodializy, osiągnano bardzo dobre efekty odsolenia – w granicach 85÷99%, przy 2÷3-krotnym zateżnieniu roztworu substancji organicznych.

Bieżąca analiza doniesień literaturowych wskazuje, że koncepcja usuwania soli mineralnych z roztworów zawierających substancje organiczne na szerszą skalę została wdrożona przede wszystkim w przemyśle chemicznym, spożywczym i farmaceutycznym [4]. Proces elektrodializy (z jej różnymi modyfikacjami) jest stosowany do odzyskiwania kwasów mineralnych i organicznych, odsalania serwatki, demineralizacji soku cukrowego, odsalania produktów białkowych i aminokwasów, odsalania glutaminy, wytwarzania witaminy C i kwasu mlekowego [5,6]. Nie wiele jest natomiast informacji o bezpośrednim wykorzystaniu elektrodializy do oczyszczania zasolonych ścieków lub wód poprocesowych. W wybudowanej na Tajwanie instalacji oczyszczającej silnie zasolone ścieki z przemysłu metalurgicznego (produkcja stali) o wydajności 350 m³/d zastosowano elektrodializę odwracalną, uzyskując 92%

Dr hab. inż. K. Majewska-Nowak, mgr inż. J. Kawiecka-Skowron: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Technologii Oczyszczania Wody i Ścieków, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
katarzyna.majewska-nowak@pwr.wroc.pl
joanna.kawiecka-skowron@pwr.wroc.pl

odsoleń ścieków i 51% zmniejszenie ChZT (co wskazuje, że część substancji organicznych o charakterze jonowym została usunięta ze ścieków), przy jednostkowym koszcie 0,15 dol./m³ [7]. Duże możliwości zastosowania tego procesu są w przemyśle papierniczym, gdzie możliwe jest odzyskiwanie składników mineralnych z ługów posiarzynowych. W pracy [8] omówiono zintegrowany proces mikrofiltracja/elektrodializa do oczyszczania ścieków z bieleń i ługów powarzelnych, odzyskując 80÷90% wody o jakości odpowiedniej do ponownego wykorzystania w produkcji i 10÷20% zagęszczonej biomasy (jako źródło energii). W zaproponowanym systemie rola mikrofiltracji polegała na wstępnym oczyszczeniu ścieków (usunięcie zawiesin i barwnych substancji koloidalnych), co zapewniło lepsze warunki pracy stosu elektrodializacyjnego. Wykazano, że zintegrowany układ mikrofiltracja/elektrodializa charakteryzował się dużą wydajnością, małą podatnością na blokowanie membran (fouling) oraz małym zużyciem energii.

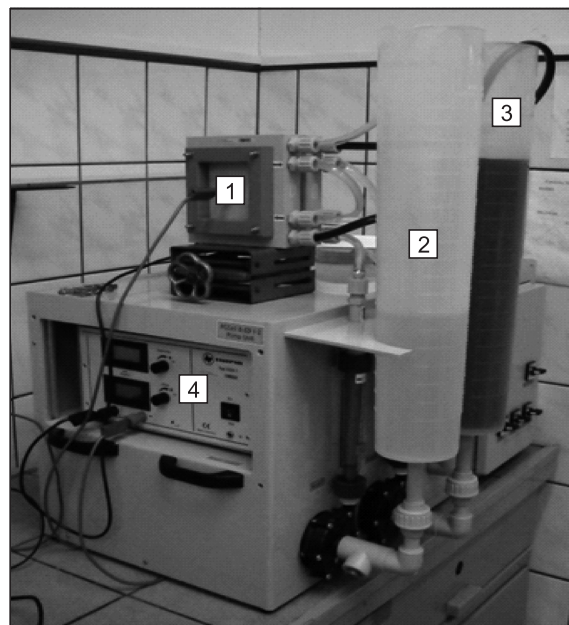
Wysokociśnieniowe procesy membranowe od dawna są wykorzystywane w zamkniętych obiegach wody w przemyśle włókienniczym, natomiast nie jest powszechne stosowanie do tego celu membranowych technik prądowych. Ostatnio w pracy [9] wykazano przydatność procesu elektrodializy do odsalania ścieków włókienniczych w warunkach laboratoryjnych. W badaniach tych wykorzystano zarówno roztwory modelowe, jak i ścieki włókiennicze o zawartości chlorku sodu i siarczanu sodu w ilości 6÷7 g/dm³. Wykazano, że po wstępnej filtracji i przy optymalnej gęstości prądu (4,2 mA/cm²) możliwe było 95% usunięcie soli ze ścieków, co pozwoliło na ich powtórne użycie jako wody technologicznej lub bezpieczne odprowadzenie do odbiornika.

Badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu określenie przydatności konwencjonalnej elektrodializy do odsalania modelowych roztworów anionowych barwników organicznych.

Metodyka badań

Badania nad odsalaniem wodnych roztworów barwników metodą elektrodializy przeprowadzono wykorzystując jonowymienne membrany (PCA GmbH, Niemcy) typu PC-SK oraz PC-SA, których właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Proces elektrodializy przeprowadzono w przedstawionej na rysunku 1 laboratoryjnej instalacji PCCell BED-1 System (PCCell GmbH, Niemcy), wyposażonej w elektrodializer typu PCCell 64002 zawierający 10 par komór (tab. 2).



Rys. 1. Instalacja elektrodializacyjna PCCell (1 – stos elektrodializacyjny, 2 – zbiornik koncentratu, 3 – zbiornik diluatu, 4 – zasilacz)
Fig. 1. Electro-dialytic installation PCCell (1 = electro-dialytic stack, 2 = concentrate tank, 3 = diluate tank, 4 = power supply)

Przeprowadzono proces elektrodializacyjnego odsalania roztworów anionowych barwników organicznych o stężeniu w zakresie 8÷12 g/m³ z dodatkiem chlorku sodu w ilości 1 gNaCl/dm³. W badaniach zastosowano następujące barwniki (Merck, Zachem): czerń amidowa (618 Da), żółcień tytanowa (696 Da), zieleń bezpośrednia (878 Da), błękit helionowy (980 Da) i czerń bezpośrednia (1060 kDa). Właściwe badania odsalania roztworów barwników poprzedzono testowaniem instalacji w stosunku do roztworów soli mineralnej o stężeniu 1 g/dm³, 2 g/dm³, 5 g/dm³ i 10 g/dm³.

Początkowe objętości dializatu i koncentratu były takie same i wynosiły po 2 dm³. W momencie rozpoczęcia procesu w komorach diluatu znajdował się roztwór

Tabela 1. Charakterystyka membran jonowymiennych
Table 1. Characteristics of the ion-exchange membranes tested

Parametr	Typ membrany	
	kationowymienna PC-SK	anionowymienna PC-SA
Wymiary, mm	110×110	
Grubość, μm	90÷130	
Pojemność jonowymienna, mval/g	około 1,2	około 1,1
Oporność, Ω cm ²	1+3	1+3
Odporność termiczna (maksymalna temperatura pracy), °C	60	60
Odporność chemiczna (zakres pH)	0+9	0+9
Odporność mechaniczna (maksymalne ciśnienie pracy), MPa	0,4+0,5	0,4+0,5
Selektywność (liczba przenoszenia) KCl (0,1 mol/dm ³)/KCl (0,5 mol/dm ³)	>0,95	>0,93
Forma jonowa	Na ⁺	Cl ⁻
Grupa funkcyjna	-SO ₃ ⁻	-NR ₄ ⁺

Tabela 2. Charakterystyka dwukomorowego elektrodializera PCCell 64002
Table 2. Characteristics of the two-compartment electro-dialytic stack PCCell 64002

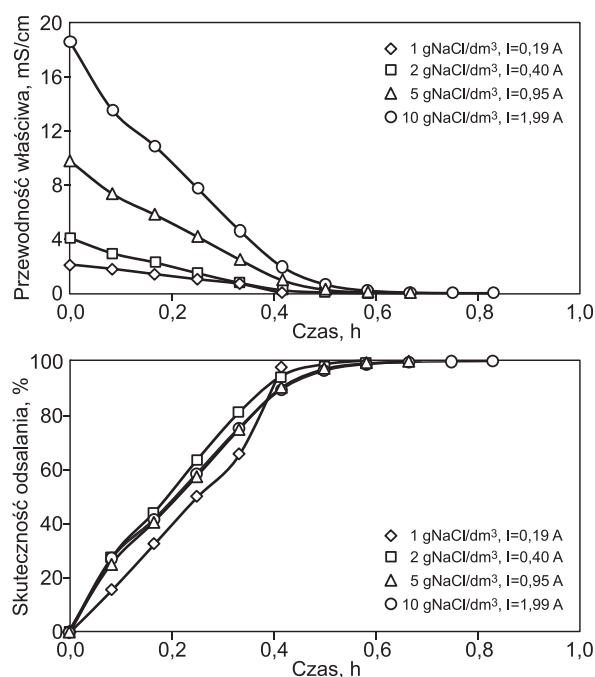
Parametr	Wartość/opis
Wymiary membrany, mm	110×110
Powierzchnia czynna membrany, cm ²	64
Grubość komory, mm	0,5
Liczba par komór	do 20
Anoda	platyna pokryta tytanem
Katoda	stal V4A
Obudowa elektrod	polipropylen

wybranego barwnika z dodatkiem chlorku sodu, zaś do komór koncentratu wprowadzono roztwór soli mineralnej o taki samym stężeniu jak w komorach diluatu. W testach wstępnych, przeprowadzonych jedynie w stosunku do roztworów soli mineralnej, początkowe stężenia NaCl w obu obiegach były takie same. Instalacja pracowała w układzie porcjowym, tzn. strumienie diluatu i koncentratu cyrkulowały w stosie elektrodializera aż do momentu zakończenia procesu odsalania. Testy wykonano przy natężeniu prądu w zakresie 0,05÷2 A. W czasie odsalania obserwowano zmianę napięcia w czasie, przy czym jako moment zakończenia procesu przyjęto wzrost napięcia do wartości 24,5 V. W komorach elektrodowych cyrkulował roztwór chlorku sodu o stężeniu 2 g/dm³. W czasie testów określono stężenia barwników zarówno w strumieniu diluatu, jak i koncentratu. Oznaczenia wykonano co 10÷20 min, mierząc absorbancję roztworów przy długości fali odpowiadającej maksymalnej absorpcji danego barwnika [10]. W oznaczeniach wykorzystano spektrofotometr UVMINI-1240 (Shimadzu) i kuwety 0,5 cm. W celu określenia stopnia odsolenia roztworów barwników, co 10÷20 min zmierzono przewodność właściwą roztworów w komorach diluatu i koncentratu (konduktometr Elmetron CC-411).

Dyskusja wyników

Zużyte kąpiele farbiarskie zawierają na ogół duże ilości soli mineralnych, co uzasadnia możliwość separacji wielkocząsteczkowych barwników organicznych z roztworów soli metodą elektrodializy. Z drugiej zaś strony, zbyt duża zawartość barwników w roztworach poddawanych procesowi elektrodializy może ograniczać właściwą pracę stosu elektrodializy. Z tego względu, w przyjętej koncepcji waloryzacji kąpiele farbiarskich założono, iż najodpowiedniejszy będzie układ zintegrowany ultrafiltracja/elektrodializa. Dlatego przyjęty zakres stężeń barwników (8÷12 g/m³) w roztworach poddanych procesowi elektrodializy odpowiadał stężeniom barwników w permeatach otrzymanych po procesie ultrafiltracji przez membrany ceramiczne (Tami Industries, CÉRAM INSIDE®) o granicznej rozdzielczości 15÷50 kDa [10].

Skuteczność odsalania, uzyskaną w 10-komorowym elektrodializerze typu PCCell 64002, przedstawiono na rysunku 2. Uzyskano stosunkowo wysokie stopnie odsolenia badanych roztworów (90÷95,4%), niezależnie od początkowej zawartości chlorku sodu. Jednakże wartości przewodności właściwej diluatu po zakończeniu procesu (a więc w momencie wzrostu napięcia do wartości 24,5 V) różniły się znacznie i wynosiły 96,4 μS/cm, 239 μS/cm, 971 μS/cm i 1949 μS/cm, odpowiednio przy stężeniu soli 1 g/dm³,



Rys. 2. Skuteczność elektrodializy odsalania roztworu chlorku sodu

Fig. 2. ED desalination effects for sodium chloride solutions

2 g/dm³, 5 g/dm³ i 10 g/dm³. Możliwe było osiągnięcie przewodności diluatu w zakresie 25÷45 μS/cm w przypadku wszystkich roztworów soli, ale już przy niekorzystnych warunkach malejącego natężenia prądu. Zaobserwowano jednocześnie, że czas odsalania ulegał stopniowemu wydłużeniu wraz ze wzrostem stężenia soli (z 30 min przy 1 gNaCl/dm³ do 50 min przy 10 gNaCl/dm³), mimo iż natężenie prądu, przy którym prowadzono proces, zwiększano proporcjonalnie do początkowego stężenia soli. Świadczyło to o pogarszaniu się warunków selektywnej migracji jonów wskutek rosnącego gradientu stężeń pomiędzy komorami koncentratu a diluatu i zwiększaniu zużycia energii wraz ze wzrostem zasolenia roztworu. Z ekonomicznego punktu widzenia najkorzystniejsze było prowadzenie procesu odsalania (w opisanych warunkach) przez 25÷30 min.

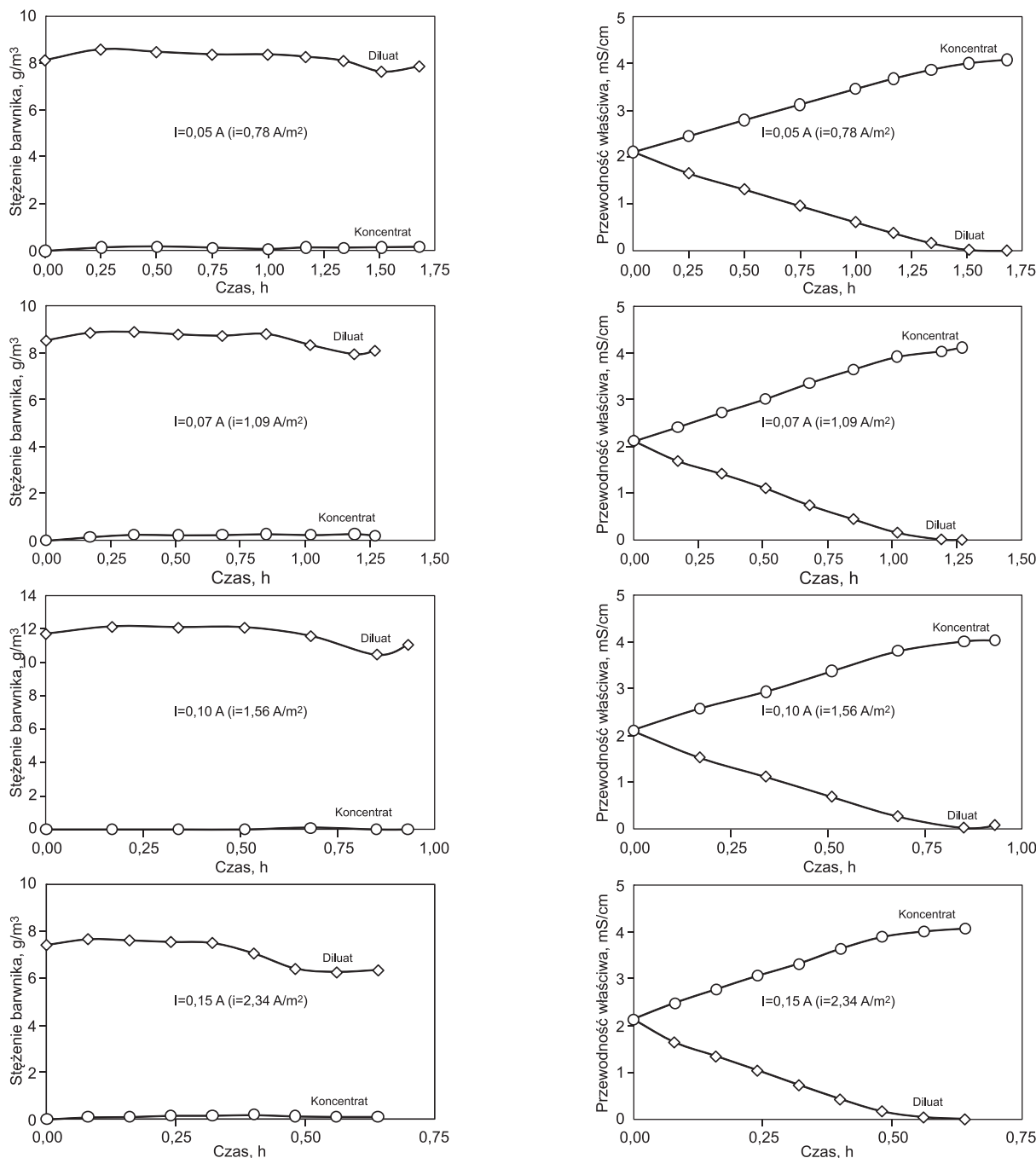
Proces właściwego odsalania przeprowadzono w stosunku do zasolonych roztworów pięciu barwników – czerni amidowej, żółci tytanowej, zieleni bezpośredniej, błękitu helionowego i czerni bezpośredniej. Stężenie chlorku sodu wynosiło 1 gNaCl/dm³. Celem tego etapu badań była ocena przydatności procesu elektrodializy do odsalania mieszaniny barwnika i soli mineralnej. W przypadku każdego barwnika wykonano po jednej wstępnej serii pomiarowej przy natężeniu prądu 0,1 A.

Mając na uwadze osiągnięcie założonego celu badań, istotne było utrzymanie stężenia barwnika w komorach diluatu porównywalnego ze stężeniem początkowym, przy maksymalnym odsoleniu diluatu. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że jedynie w przypadku czerni bezpośredniej uzyskano zadowalający rezultat oddzielenia barwnika od soli mineralnej. W przypadku barwników o mniejszej masie cząsteczkowej (czerni amidowa, żółci tytanowa) zaobserwowano zjawisko sorpcji membranowej, tzn. stężenie barwnika w komorach diluatu systematycznie malało. Jednocześnie brak widocznego przyrostu stężenia barwnika w komorach koncentratu sugerował, iż barwne aniony tych barwników były na tyle małe, że wniknęły w strukturę membrany jonowymiennej lub uległy sorpcji na powierzchni membran. Barwniki o większej masie

cząsteczkowej (zielen bezpośrednia, błękit helionowy) podlegały sorpcji membranowej w mniejszym stopniu – stężenie tych barwników w komorach diluatu po zakończeniu procesu odsalania wynosiło 47% (zielen bezpośrednia) i 50% (błękit helionowy) w stosunku do stężenia początkowego. Cząsteczki z żadnego z testowanych barwników nie pojawiły się w znaczącym stężeniu w komorach koncentratu, co jedynie potwierdziło występowanie zjawiska sorpcji membranowej. Jednocześnie stwierdzono wysoki stopień odsolenia (ponad 98%) wszystkich analizowanych roztworów barwników w ciągu 50 min. Wydłużenie czasu odsalania w stosunku do roztworów chlorku sodu niezawierających barwników z 30 min do 50 min sugeruje pogorszenie warunków selektywnego transportu jonów soli w obecności cząsteczek anionowych barwników organicznych. Uwzględniając uzyskane wyniki badań, do dalszych testów odsalania wykorzystano jedynie roztwory czerni

bezpośredniej zawierające 1 gNaCl/dm^3 . Skuteczność elektrodialitycznego odsalania roztworu tego barwnika przy różnych wartościach natężenia prądu (0,05 A, 0,07 A, 0,10 A i 0,15 A) przedstawiono na rysunku 3.

Stwierdzono, że stężenie czerni bezpośredniej w komorach diluatu utrzymywało praktycznie stałą wartość aż do uzyskania całkowitego odsolenia roztworu barwnika, zwłaszcza przy mniejszych gęstościach prądu. Przy największym natężeniu prądu (0,15 A) stężenie barwnika zmniejszyło się o około 20%. Stwierdzono minimalny przeciek barwnika do komór koncentratu (<2%). Zwiększenie gęstości prądu znacząco skróciło czas odsalania roztworu czerni bezpośredniej – ze 100 min przy $i=0,78 \text{ A/m}^2$ do 40 min przy $i=2,34 \text{ A/m}^2$. Jednakże większa gęstość prądu może spowodować zintensyfikowanie zjawiska sorpcji membranowej, czyli wnikanie makroanionu barwnika w strukturę membrany jonowymiennej.



Rys. 3. Skuteczność elektrodialitycznego odsalania roztworu czerni bezpośredniej (początkowe stężenie NaCl – 1 g/dm^3)
Fig. 3. ED desalination effects for direct black solutions (initial NaCl concentration: 1 g/dm^3)

Doniesienia literaturowe na temat mechanizmów elektrodializacyjnej separacji zdysocjowanych substancji organicznych z zasolonych roztworów są raczej skromne. Ostatnio jedynie w pracach [11,12] podjęto próbę wyjaśnienia zjawisk zachodzących podczas odsalania roztworów szeregu kwasów tłuszczowych, uzyskując zbliżone wyniki do przedstawionych w niniejszej pracy. Zaobserwowano, że skuteczność separacji małych anionów organicznych (mrówczanowego, octanowego, propionianowego i maślanowego) z wodnych roztworów chlorku sodu i siarczynu magnezu zwiększała się wraz ze wzrostem rozmiaru separowanego anionu organicznego. Aniony mineralne były transportowane zdecydowanie szybciej przez membrany jonowymiennie, natomiast badane aniony organiczne były na tyle małe, że też migrowały przez membrany, bądź wnikały w strukturę membran, przyczyniając się do modyfikacji ich właściwości. W konsekwencji stwierdzono, że skuteczność elektrodializacyjnego odsalania zależała nie tylko od długości łańcucha organicznego anionu, ale także od jego wartościowości i grup funkcyjnych.

Separacja małych organicznych jonów z roztworów soli mineralnych jest stosunkowo trudna, ze względu na zbliżone rozmiary jonów i konkurencyjny transport membranowy. Z kolei w procesie odsalania wód zanieczyszczonych naturalnymi substancjami organicznymi, a więc makrocząsteczkami, obserwuje się intensywne blokowanie membran. Również anionowe barwniki organiczne, zwłaszcza te o większej masie cząsteczkowej, mają na ogół charakter hydrofobowy [13]. Uzyskane wyniki badań nie potwierdziły blokowania membran jonowymiennych przez czerni bezpośrednią (przy mniejszej gęstości prądu), natomiast zjawisko to mogło mieć miejsce w przypadku odsalania roztworów błękitu helionowego i zieleni bezpośredniej, a także czerni amidowej i żółci tytanowej. Wydaje się, że zastosowanie elektrodializy z membranami monoanionoselektywnymi powinno przyczynić się do poprawy skuteczności odsalania wraz z odzyskiwaniem anionowych barwników organicznych.

Wnioski

♦ Proces elektrodializy może być stosowany do odsalania roztworów anionowych barwników organicznych, jednakże ekonomiczne jest jedynie odzyskiwanie barwników o dużej masie cząsteczkowej (ponad 1000 Da).

♦ Skuteczność rozdziału anionowych barwników organicznych od soli mineralnych zależała od natężenia prądu i masy cząsteczkowej barwników. Przy większych wartościach natężenia prądu i mniejszej masie cząsteczkowej barwników stwierdzono wzmożoną adsorpcję cząsteczek barwników w strukturze membran jonowymiennych.

♦ Zastosowane membrany jonowymiennie skutecznie ograniczały przenikanie cząsteczek barwników organicznych do komór koncentratu (stężenie barwników w koncentracie nie przekroczyło $0,3 \text{ g/m}^3$).

Praca została sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, jako projekt nr N N523 424637.

LITERATURA

1. P. MIKULÁŠEK, V. KOPECKÝ, O. KUŠNÍRIK: Characterization of nanofiltration membranes used in the separation of aqueous dye-salt solutions. *Environment Protection Engineering* 2005, Vol. 31, No. 3–4, pp. 169–176.
2. H. PUETTER, E. ROSKE: Concentrating aqueous solutions of organic compounds which contain salts, with simultaneous reduction of salt content. U.S. Patent No. 4802965, 1989.
3. H. VOSS: Removal of salts by electro dialysis. U.S. Patent No. 5089102, 1992.
4. X. TU: Ion exchange membranes: State of their development and perspective, *Journal of Membrane Science* 2005, Vol. 263, pp. 1–29.
5. R.K. NAGARALE, G.S. GOHIL, V.K. SHAHI: Recent developments on ion-exchange membranes and electro-membrane processes. *Advances in Colloid and Interface Science* 2006, Vol. 119, pp. 97–130.
6. J.A. WIŚNIEWSKI, A. RÓŻAŃSKA: Ekonomiczne aspekty odzyskiwania kwasów i soli metali ze ścieków przemysłowych. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 2, ss. 43–47.
7. Y.M. CHAO, T.M. LIANG: A feasibility study of industrial wastewater recovery using electro dialysis reversal. *Desalination* 2008, Vol. 221, pp. 433–439.
8. S.K. NATARAJ, S. SRIDHAR, I.N. SHAIKHA, D.S. REDDY, T.M. AMINABHAVI: Membrane-based microfiltration/ electro dialysis hybrid process for the treatment of paper industry wastewater. *Separation and Purification Technology* 2007, Vol. 57, pp. 185–192.
9. M. CHANDRAMOWLEESWARAN, K. PALANIVELU: Treatability studies on textile effluent for total dissolved solids reduction using electro dialysis. *Desalination* 2006, Vol. 201, pp. 164–174.
10. K. MAJEWSKA-NOWAK, J. KAWIECKA-SKOWRON: Badania przydatności membran ceramicznych do usuwania barwników organicznych z roztworów wodnych. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 2, ss. 55–60.
11. Y. ZHANG, L. PINOY, B. MEESCHAERT, B. van der BRUGGEN: Separation of small organic ions from salts by ion-exchange membrane in electro dialysis. *AIChE Journal* 2010 (wileyonlinelibrary.com), DOI:10.1002/aic.12433.
12. Y. ZHANG, B. van der BRUGGEN, L. PINOY, B. MEESCHAERT: Separation of nutrient ions and organic compounds from salts in RO concentrates by standard and monovalent selective ion-exchange membranes used in electro dialysis. *Journal of Membrane Science* 2009, Vol. 332, pp. 104–112.
13. K. MAJEWSKA-NOWAK: Application of ceramic membranes for separation of dye particles. *Desalination* 2010, Vol. 254, pp. 185–191.

Majewska-Nowak, K., Kawiecka-Skowron, J. Desalination of Organic Dye Solutions by Electro dialysis. *Ochrona Środowiska* 2011, Vol. 33, No. 2, pp. 11–15.

Abstract: Laboratory tests were conducted to verify the applicability of electro dialysis (ED) as a method for the desalination of model solutions containing anionic organic dyes. For this purpose use was made of a laboratory ED stack with 10 cell pairs. The tests were performed with five anionic organic dyes differing in molecular weight (from 618 to 1060 Da), at a current intensity ranging from 0.05 to 0.2 A. Dye and sodium chloride concentrations in the concentrate and diluate were determined in the course of the ED process performed in the batch system. The study has produced the following findings. The ED process enabled anionic dye and mineral salt recovery by receiving

two streams from a salt and dye mixture – one being enriched with dye alone (diluate), and the other one being a salt solution with no organic matter present (concentrate). The efficiency of separation strongly depended on the current intensity applied and the molecular weight of the dye. The most efficient was the desalination of the direct black solution – the dye concentration in the diluate remained almost constant, and salt removal totalled 98.5%. The final dye concentration in the concentrate was negligibly low. The concentrations of low-molecular-weight dyes in the diluate decreased with operation time, which should be attributed to the adsorption of dye particles in the structure or at the surface of the membrane.

Keywords: Membrane processes, electro dialysis, ion-exchange membrane, desalination, dye.