

Małgorzata Kabsch-Korbutowicz

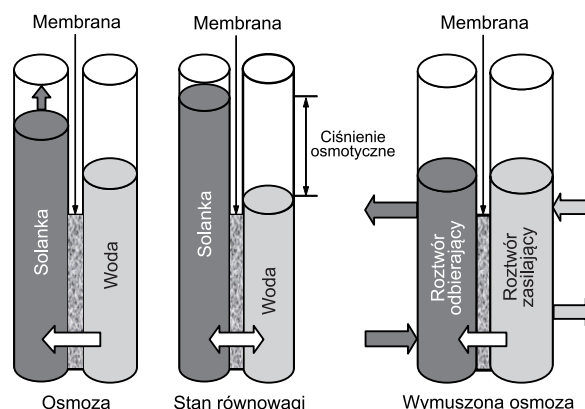
Zastosowanie procesu wymuszonej osmozy do odsalania i odnowy wody

Jednym z najważniejszych wyzwań, przed którym staje współczesna cywilizacja jest zaspokojenie rosnących potrzeb na wodę zdatną do picia oraz używaną w rolnictwie i w różnych gałęziach przemysłu. Przewiduje się, że w 2025 r. 5,5 mld ludzi (2/3 populacji) będzie żyło na obszarach narażonych na tzw. stres wodny. Oznacza to, że ilość odnawialnych zasobów wodnych (tzw. wskaźnik Falkenmarka) na jedną osobę w ciągu roku będzie wynosiła poniżej 1700 m³. Około 1,8 mld ludzi będzie żyło w rejonach o znaczącym niedoborze wody (wartość wskaźnika Falkenmarka <1000 m³ na osobę rocznie) [1]. Malejące zasoby wód naturalnych, które mogłyby być wykorzystane do celów spożywczych, przemysłowych lub rolniczych powodują, że coraz częściej wykorzystuje się uzdatnioną wodę morską lub wodę odzyskaną ze ścieków. Użycie tych źródeł wody wymaga jednak – w celu usunięcia wszystkich występujących w nich zanieczyszczeń – zastosowania zaawansowanych procesów technologicznych, np. odwróconej osmozy (RO) lub procesów termicznych (MSF – odparowanie równowagowe, MED – odparowanie wielokrotne, VC – destylacja przez sprężanie pary), co jest związane z dużymi nakładami energetycznymi, a tym samym wysokimi kosztami pozyskania wody. Stąd też ciągle poszukiwane są nowe procesy, które – przy mniejszym zużyciu energii – pozwoliłyby skutecznie usuwać z roztworów wodnych zanieczyszczenia występujące m.in. w formie jonowej, a tym samym umożliwiłyby odzyskiwanie wody ze ścieków oraz wód zasolonych. Jednym z takich procesów może być wymuszona osmoza (forward osmosis, manipulated osmosis, engineered osmosis, direct osmosis).

Wymuszona osmoza

Wymuszona osmoza (FO) jest procesem technologicznym wykorzystującym zjawisko osmozy, czyli dyfuzji rozpuszczalnika przez błonę półprzepuszczalną rozdzielającą dwa roztwory o różnych wartościach stężenia. Przepływ rozpuszczalnika zachodzi od roztworu o mniejszym stężeniu substancji rozpuszczonej do roztworu o stężeniu większym, czyli prowadzi do wyrównania wartości stężenia obu roztworów. W procesie FO, prowadzonym w warunkach ciśnienia atmosferycznego, woda przenika przez syntetyczną membranę z roztworu poddawanego oczyszczaniu

(na przykład woda morska lub ścieki) do stężonego roztworu odbierającego (draw solution, osmotic agent, draw agent). Siła napędowa procesu wytwarzana jest w sposób naturalny i jest skutkiem różnicy wartości ciśnienia osmotycznego roztworów po obu stronach membrany. Przepływ wody jest spontaniczny i proces ten nie wymaga stosowania energii zewnętrznej (poza energią związaną z cyrkulacją roztworów po obu stronach membrany). Proces może zachodzić tak długo, aż nie nastąpi wyrównanie wartości ciśnienia osmotycznego roztworów po obu stronach membrany i nie zostanie osiągnięty stan równowagi (rys. 1).



Rys. 1. Idea procesu wymuszonej osmozy
Fig. 1. The idea of forward osmosis process

Strumień wody (Q) przenikający przez membranę w procesie wymuszonej osmozy może być wyznaczony z zależności:

$$Q = K_{20^{\circ}\text{C}} 1,02^{(T-20^{\circ}\text{C})} A (\pi_D - \pi_F) \quad (1)$$

w której:

K – współczynnik przenikania masy, m/s

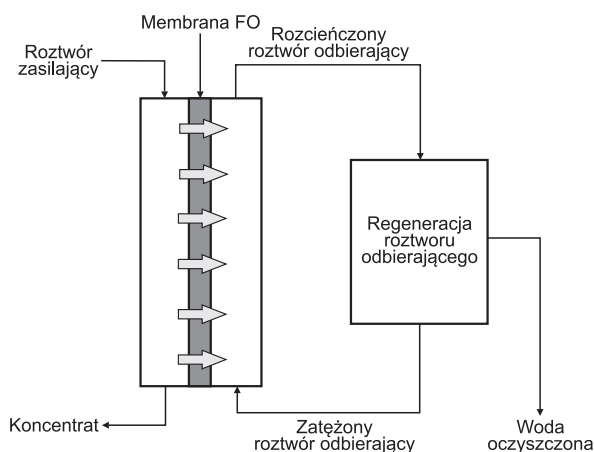
T – temperatura, °C

A – powierzchnia membrany, m²

π_D – ciśnienie osmotyczne roztworu odbierającego, Pa

π_F – ciśnienie osmotyczne roztworu oczyszczanego, Pa

Woda, która przeniknęła przez membranę powoduje rozcieńczenie roztworu odbierającego i stąd – jeśli celem procesu jest uzyskanie wody odsolonej – kolejnym etapem jest jego regeneracja, skutkująca uzyskaniem dwóch strumieni – czystej wody oraz odzyskanego zatężonego roztworu osmotycznego, który może być ponownie użyty. Schemat pełnego układu technologicznego pozyskiwania wody odsolonej w procesie wymuszonej osmozy przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Układ technologiczny oczyszczania wody w procesie wymuszonej osmozy

Fig. 2. The technological set-up of water treatment with the use of forward osmosis

Zjawisko naturalnej osmozy było wykorzystywane już przez cywilizacje pierwotne. Zaobserwowano, że sól może być użyta do suszenia żywności, co pozwalało na jej długie przechowywanie. Wynikało to z faktu, że w środowisku o dużym stężeniu elektrolitów następowało odwodnienie komórek bakterii, grzybów i innych mikroorganizmów, co powodowało ich dezaktywację. Badania mające na celu opisanie zjawiska transportu przez membrany biologiczne prowadzono już w XVIII wieku. Pierwszym opracowaniem poświęconym zjawisku transportu wody przez membranę biologiczną była opublikowana w 1748 r. praca francuskiego zakonnika Jeana Antoine Nolleta. 80 lat później francuski fizjolog Henri du Trochet opisał zjawisko transportu osmotycznego [2].

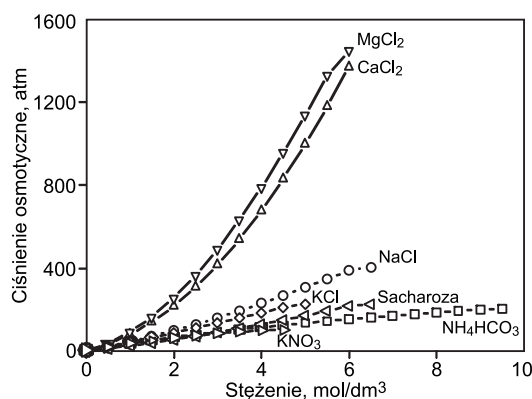
Prace nad zastosowaniem procesu wymuszonej osmozy rozpoczęły się w latach 60. XX wieku. W 1965 r. G. W. Batchelder [3] opatentował metodę odsalania wody z wykorzystaniem tego procesu. W późniejszych latach prowadzono badania nad usprawnieniem procesu odsalania wody przy użyciu różnych roztworów odbierających [4–6]. Membrany FO wykorzystano również do wytwarzania woreczków zawierających koncentraty napojów (tzw. worki osmotyczne – osmotic bag) [7]. W warunkach ekstremalnych mogą one również posłużyć do przygotowania napojów z wody morskiej lub ze ścieków.

Roztwór odbierający (roztwór osmotyczny)

O wydajności procesu wymuszonej osmozy decydują w znacznym stopniu właściwości roztworu odbierającego. Powinien się on charakteryzować dużym ciśnieniem osmotycznym przy możliwie małym stężeniu, małą lepkością, łatwością odzyskiwania, niskim kosztem i nie może być on toksyczny. Ponadto dyfuzja wsteczna składników roztworu osmotycznego do roztworu zasilającego powinna być ograniczona. Od połowy lat 60. XX wieku, kiedy opracowano podstawy procesu wymuszonej osmozy, przeanalizowano przydatność wielu związków chemicznych do sporządzania roztworów odbierających. Zastosowanie znalazły [8]:

- gazy rozpuszczone w wodzie (SO_2 lub mieszanina NH_3 i CO_2),
- cukry (glukoza, fruktoza, sacharoza),
- sole nieorganiczne (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$),
- sole organiczne (sole Na^+ i Mg^{2+} kwasu mrówkowego, octowego lub propionowego),
- hydrofilowe nanocząstki magnetyczne.

Wartości ciśnienia osmotycznego niektórych roztworów odbierających wykorzystywanych w procesie odwróconej osmozy przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Wpływ stężenia roztworu na wartość ciśnienia osmotycznego roztworów odbierających wykorzystywanych w procesie wymuszonej osmozy (temp. 25°C) [9]

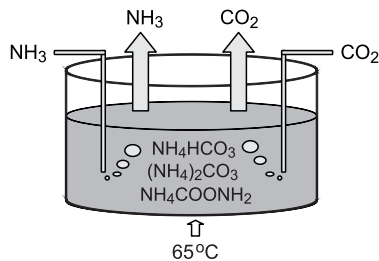
Fig. 3. The influence of concentration on the osmotic pressure of draw solutions used in forward osmosis (temp. 25°C) [9]

Regeneracja roztworu odbierającego

Chęć odzyskania czystej wody oraz wielokrotnego użycia roztworu odbierającego, który w trakcie prowadzenia procesu wymuszonej osmozy ulega rozcieńczeniu, co skutkuje spadkiem ciśnienia osmotycznego, powoduje konieczność prowadzenia jego regeneracji. Zastosowanie do tego celu znajdują najczęściej procesy termiczne, membranowe (odwrócona osmoza, nanofiltracja, ultrafiltracja, destylacja membranowa) oraz elektromagnetyczne. Wybór procesu regeneracji zależy przede wszystkim od właściwości związków użytych do sporządzenia roztworu odbierającego, w tym masy cząsteczkowej, rozpuszczalności w wodzie lub obecności mikromagnesów. Użyta procedura regeneracji roztworu odbierającego jest także bardzo istotna z uwagi na całkowity koszt procesu wymuszonej osmozy [10].

Popularność użycia gazów do sporządzania roztworów osmotycznych wynika z faktu, że ich usunięcie z rozcieńczonego roztworu możliwe jest przez jego podgrzanie, co skutkuje dyfuzją gazu do atmosfery. Już w 1965 r. zaproponowano użycie SO_2 do przygotowania roztworu osmotycznego, używanego do odsalania wody w procesie wymuszonej osmozy [3], natomiast na początku XXI wieku zastosowano mieszaninę NH_3 i CO_2 do tego celu [11]. Roztwór powstający po dodaniu do wody gazów zawiera (NH_4) $_2$ CO_3 , NH_4HCO_3 i $\text{NH}_4\text{COONH}_2$. Regeneracja takiego roztworu możliwa jest przez jego podgrzanie do 65°C, co powoduje rozpad soli i wydzielenie z roztworu składników gazowych, a tym samym odzyskanie czystej wody. Zaobserwowano jednak, że w oczyszczonej wodzie zawartość azotu amonowego przekracza 1,5 gN/m³ [12], co powoduje, że woda tak uzyskana nie nadaje się do spożycia. Ideę wykorzystania NH_3 i CO_2 do sporządzania roztworu odbierającego w procesie odwróconej osmozy przedstawia schematycznie rysunek 4.

Regeneracja roztworów osmotycznych zawierających małowielocząsteczkowe sole nieorganiczne lub organiczne wymaga użycia odwróconej osmozy, nanofiltracji lub destylacji membranowej. Odzyskanie wody i roztworu osmotycznego zawierającego nanocząstki jest możliwe przy zastosowaniu ultrafiltracji [14] albo użyciu zewnętrznego pola magnetycznego lub elektrycznego [15].



Rys. 4. Idea stosowania NH_3 i CO_2 do sporządzania roztworu odbierającego [13]

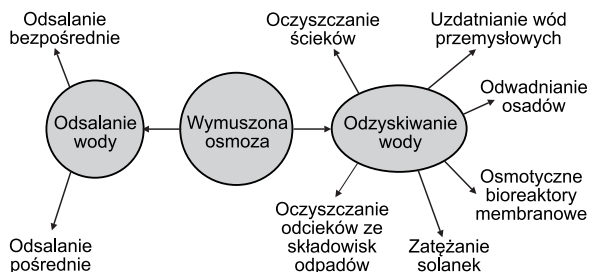
Fig. 4. The idea of NH_3 and CO_2 usage for draw solution preparation [13]

Membrany

W procesie wymuszonej osmozy – podobnie jak w odwróconej osmozie – zastosowanie znalazły nieporowate membrany asymetryczne wytwarzane z polimerów hydrofilowych. Najczęściej używane są membrany wytworzone z trójctanu celulozy lub membrany kompozytowe zawierające poliamidową warstwę aktywną [16]. Ze względu na fakt, że transport wody przez membranę nie wymaga zastosowania ciśnienia hydrostatycznego, membrany używane w procesie FO mogą być cieńsze od tych wykorzystywanych w RO, a dodatkowo pory w warstwie podtrzymującej powinny być możliwie mało kręte, w celu zmniejszenia oporów przepływu [17].

Zastosowanie wymuszonej osmozy w inżynierii środowiska

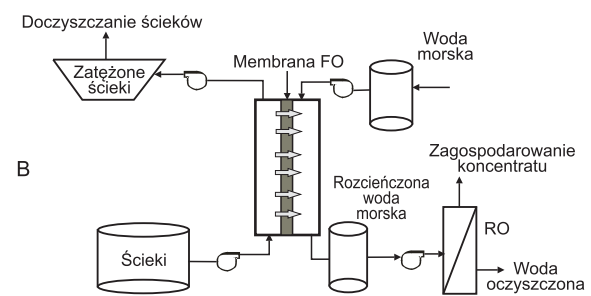
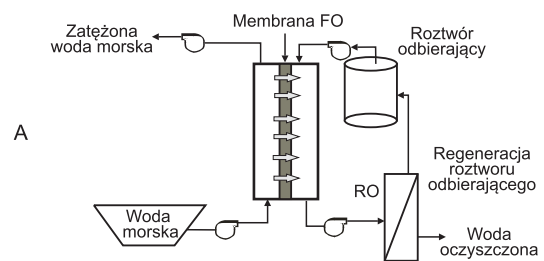
Wymuszona osmoza znajduje obecnie coraz częściej zastosowanie w wielu dziedzinach oczyszczania wody i ścieków (rys. 5). Technika ta pozwala zarówno na odsalanie wody morskiej, jak i odzyskiwanie wody ze ścieków.



Rys. 5. Obszary wykorzystania wymuszonej osmozy w inżynierii środowiska

Fig. 5. The areas of forward osmosis usage in environmental engineering

W przypadku użycia procesu FO do odsalania wody stosowane są dwa warianty układów technologicznych – odsalanie bezpośrednie lub pośrednie (rys. 6). Podczas bezpośredniego odsalania woda przenika przez membranę do roztworu odbierającego, który następnie jest poddawany regeneracji. W efekcie uzyskuje się odsoloną wodę oraz zateżony roztwór odbierający. Technologia ta wykorzystywana jest w uruchomionych przez firmę Modern Water Company instalacjach w Gibraltarze (2009 r., wydajność $18 \text{ m}^3/\text{d}$) oraz Omanie (Al Khaluf – 2009 r., wydajność $100 \text{ m}^3/\text{d}$) oraz Al Najdah – 2012 r., wydajność $200 \text{ m}^3/\text{d}$). Jak wykazały analizy przeprowadzone w pracy [18], wprawdzie zużycie energii na sam proces wymuszonej osmozy jest mniejsze od $0,25 \text{ kWh}/\text{m}^3$, jednak po uwzględnieniu zapotrzebowania na energię potrzebną do regeneracji roztworu odbierającego, energochłonność procesu



Rys. 6. Bezpośrednie (A) i pośrednie (B) odsalanie wody z wykorzystaniem wymuszonej osmozy

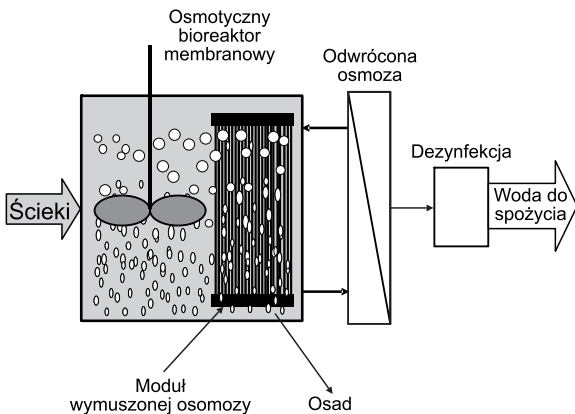
Fig. 6. Direct (A) and indirect (B) water desalination with the use of forward osmosis

pozyskiwania odsolonej wody wynosi około $3,5 \text{ kWh}/\text{m}^3$, czyli jest porównywalna ze zużyciem energii podczas odsalania wody z wykorzystaniem odwróconej osmozy. Do podobnych wniosków doszli autorzy pracy [19] porównując zużycie energii na odsalanie wody morskiej metodą dwustopniowej RO oraz FO/RO. Uwzględniając rosnące koszty energii, które stanowią do 40% całkowitych kosztów eksploatacyjnych, trwają ciągle prace nad wdrożeniem nowych technik, które przede wszystkim zmniejszyłyby koszty energii potrzebnej do regeneracji roztworu odbierającego. W 2016 r. w Ghantoot (Zjednoczone Emiraty Arabskie) zostanie uruchomiona stacja odsalania wody morskiej o wydajności $50 \text{ m}^3/\text{d}$, w której roztwór odbierający będzie regenerowany przy użyciu energii słonecznej [20].

W przypadku pośredniego odsalania wody z wykorzystaniem wymuszonej osmozy woda morska stanowi roztwór odbierający wodę ze ścieków, a w kolejnym etapie rozcieńczona woda morska jest odsalana z wykorzystaniem odwróconej osmozy. Taka technologia pozwala na obniżenie wartości ciśnienia osmotycznego wody morskiej (która będzie poddawana odsoleniu w procesie RO), usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń odpowiedzialnych za blokowanie membran RO oraz na zmniejszenie objętości ścieków, które następnie będą oczyszczane. Rozcieńczenie wody morskiej wodą odzyskiwaną ze ścieków pozwala na jej odsalanie w procesie niskociśnieniowej odwróconej osmozy (LPRO), co zdecydowanie zmniejsza energochłonność procesu. W pracy [21] wykazano, że w przypadku pozyskiwania wody ze ścieków oczyszczonych mechanicznie (przewodność ok. $2 \text{ mS}/\text{cm}$) w procesie pośredniego odsalania metodą FO/RO, przy zastosowaniu wody morskiej jako roztworu odbierającego (przewodność $52 \text{ mS}/\text{cm}$), jej rozcieńczenie powoduje, że końcowy etap odsalania metodą RO może być realizowany przy ciśnieniu 2 MPa . Odsalanie tej samej wody morskiej, bez jej wstępnego rozcieńczenia, wymagałoby zastosowania ciśnienia 6 MPa . Autorzy pracy [22], porównując zużycie energii potrzebnej do odsolenia wody morskiej metodą RO oraz na drodze pośredniego odsalania, gdy strumieniem zasilającym były ścieki po biologicznym oczyszczeniu, stwierdzili, że całkowite zapotrzebowanie na

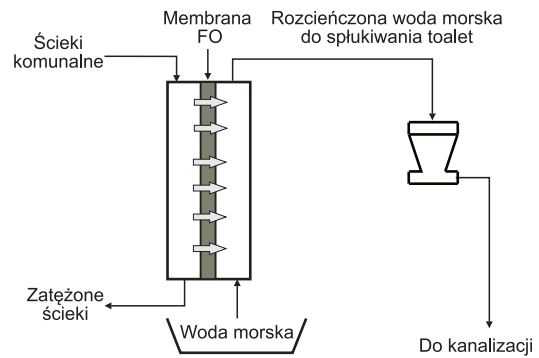
energię w procesie zintegrowanym FO/RO wynosi około $1,5 \text{ kWh/m}^3$, podczas gdy samodzielnej RO wody morskiej – około $2,5 \text{ kWh/m}^3$. Zmniejszenie objętości ścieków, na skutek odebrania z nich części wody w procesie FO, skutkuje mniejszym zapotrzebowaniem na energię potrzebną do ich transportu i oczyszczenia, a ponadto umożliwia wykorzystanie zateżonych ścieków, szczególnie tych po pierwszym stopniu oczyszczania, do wytwarzania biogazu [23].

Wymuszona osmoza znajduje także zastosowanie w układach odnowy wody łączących biologiczne oczyszczanie ścieków z użyciem bioreaktorów membranowych (MBR) oraz odsalanie wody metodą NF lub RO. W zintegrowanym procesie FO/MBR woda przenika przez membranę FO ze ścieków do roztworu odbierającego. Rozcieńczony roztwór osmotyczny poddawany jest zateżaniu z wykorzystaniem procesów RO lub NF i ponownie zawracany do układu, a uzyskana woda o wysokiej jakości może być przekazana odbiorcy. W układach tych moduły membranowe z membranami FO mogą być zanurzone w bioreaktorze (rys. 7) lub znajdować się na zewnątrz komory biologicznej. W literaturze bioreaktory membranowe z membranami FO noszą nazwę osmotycznych bioreaktorów membranowych (OMBR). Jak pokazały badania przeprowadzone przez autorów pracy [24], skuteczność eliminacji OWO oraz azotu amonowego w procesie zintegrowanym OMBR/RO wynosiła odpowiednio 99,8% i 99,4% i była znacznie większa niż uzyskiwana w samodzielnym procesie z wykorzystaniem bioreaktora membranowego. Jednym z ograniczeń wykorzystania technologii OMBR do odzyskiwania wody ze ścieków jest gromadzenie się w reaktorze biologicznym substancji rozpuszczonych [25], które z bardzo dużą skutecznością są zatrzymywane przez membrany FO. Skutkuje to wzrostem ciśnienia osmotycznego w reaktorze, a tym samym malejącą wartością siły napędowej, czego konsekwencją jest zmniejszenie wartości strumienia objętości wody.



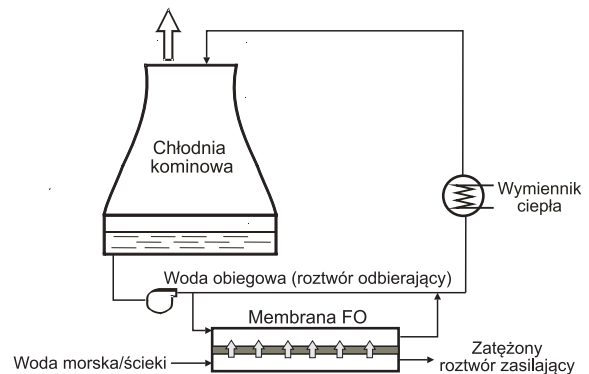
Rys. 7. Oczyszczanie ścieków z użyciem osmotycznego bioreaktora membranowego
Fig. 7. Application of osmotic membrane bioreactor to wastewater treatment

Wykorzystanie wymuszonej osmozy jest także możliwe w gospodarstwach domowych do odzyskiwania wody ze ścieków komunalnych [26]. W tym rozwiązaniu roztworem odbierającym jest woda morska, która po rozcieńczeniu może być wykorzystywana do spłukiwania toalet (rys. 8). Wydaje się, że w przypadku tego zastosowania wymuszonej osmozy wskazane byłoby jako roztwór zasilający stosować tzw. szarą wodę. Mniejsza zawartość zawieszin w tym medium ograniczałaby intensywność blokowania membran.



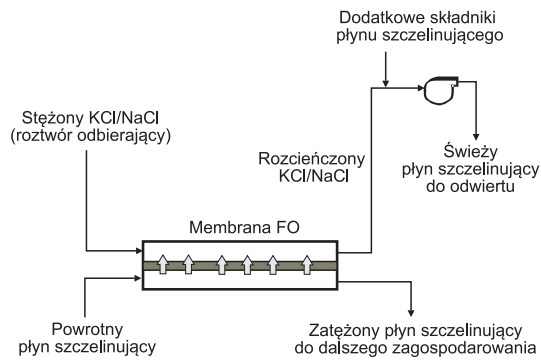
Rys. 8. Przygotowanie wody do spłukiwania toalet z wykorzystaniem wymuszonej osmozy
Fig. 8. Application of forward osmosis to preparation of water for toilet flushing

Osmotyczny proces membranowy wykorzystywany może być także do uzdatniania wody używanej w obiegach chłodniczych (rys. 9). W wyniku parowania, jakie ma miejsce w chłodniach, substancje zawarte w wodzie krążącej w obiegu ulegają zateżeniu, czego konsekwencją może być m.in. wytrącanie osadów. Aby zapobiec temu niekorzystnemu zjawisku woda krążąca w obiegu musi być rozcieńczana. Do tego celu może być stosowana woda odzyskiwana ze ścieków lub wody morskiej z wykorzystaniem wymuszonej osmozy. Zateżona woda obiegowa ma duże ciśnienie osmotyczne, a tym samym stanowi roztwór odbierający w systemie FO. Koszt tak uzdatnionej wody obiegowej jest znacznie mniejszy niż uzyskanej w klasycznych procesach odsalania.



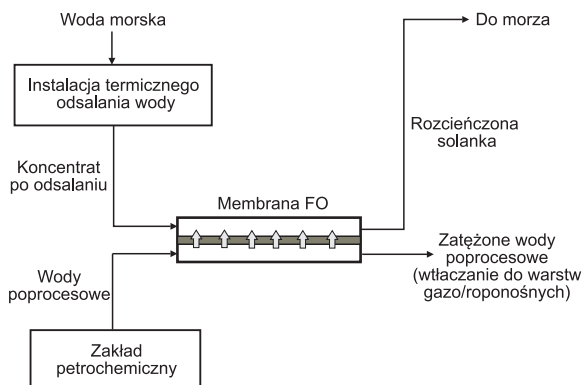
Rys. 9. Zastosowanie wymuszonej osmozy do uzupełniania wody w obiegach chłodniczych
Fig. 9. Application of forward osmosis in cooling tower water make-up

Proces wymuszonej osmozy znalazł także zastosowanie do zateżania powrotnych płynów szczelinujących stosowanych do wydobywania gazu łupkowego. Po zakończeniu procesu szczelinowania hydraulicznego odwiertu płyn szczelinujący powraca na powierzchnię. Zawiera on nie tylko chemikalia dodane przed wtłoczeniem pod ziemię, ale także cząstki skał. Do niedawna płyny powrotne były najczęściej zatłaczane pod ziemię lub zateżane na drodze odparowania, jednakże obecnie pojawiła się możliwość odzyskiwania z nich części wody z zastosowaniem membran FO [27] (rys. 10). Tak odzyskana woda jest ponownie używana do przygotowania nowych porcji płynu szczelinującego. W 2011 r. firma Oasys Water uruchomiła instalację o wydajności $480 \text{ m}^3/\text{d}$, w której do zateżania powrotnych płynów szczelinujących ze złoża Marcellus oraz do rozcieńczania świeżych roztworów szczelinujących zastosowano proces FO [28].



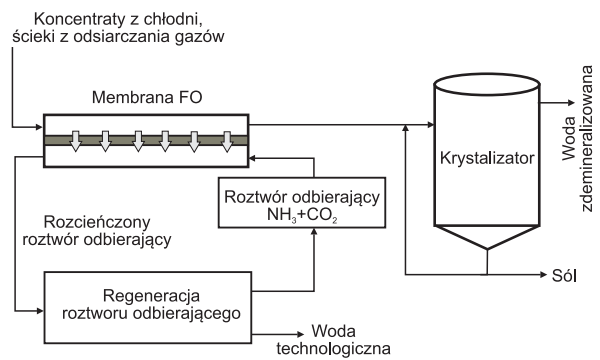
Rys. 10. Zastosowanie wymuszonej osmozy do zatężania powrotnego płynu szczelinującego
 Fig. 10. Application of forward osmosis to flow-back water concentration

Proces wymuszonej osmozy może znaleźć także zastosowanie do zatężania wód poprocesowych z przemysłu petrochemicznego [29]. Ścieki powstające z przeróbki ropy naftowej stanowią poważny problem ekologiczny na całym świecie i dlatego też trwają poszukiwania nowych, skutecznych metod ich oczyszczania i zatężania. W proponowanym rozwiązaniu (rys. 11) dodatkowo zagospodarowane zostają koncentraty po termicznym odsalaniu wody morskiej, które także stwarzają wiele problemów ekologicznych. Koncentrat po odsalaniu wody jest roztworem odbierającym wodę z roztworów poprocesowych, które po zatężeniu mogą być ponownie włączane do warstw ropoносnych. Rozcieńczony koncentrat po odsalaniu nie stanowi już zagrożenia w ekosystemie i może być bezpiecznie odprowadzony do morza.



Rys. 11. Zagospodarowanie wód poprocesowych z przemysłu petrochemicznego z wykorzystaniem wymuszonej osmozy
 Fig. 11. Management of the process water from petrochemical industry with the use of forward osmosis

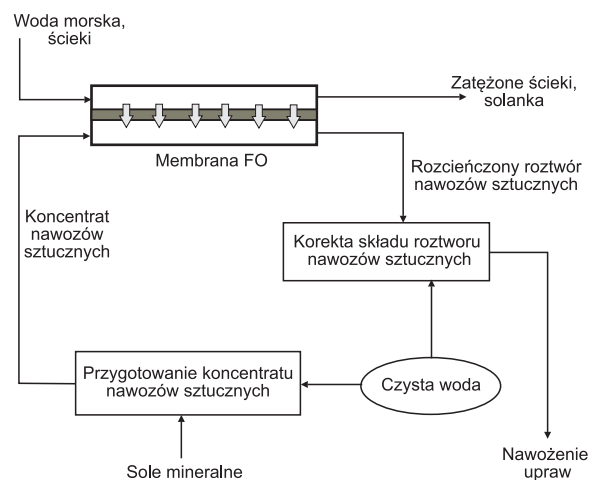
Firma Oasys Water zaproponowała wykorzystanie technologii FO w bezodpadowym procesie oczyszczania koncentratów z obiegów chłodniczych oraz roztworów powstających podczas odsiarczania spalin (rys. 12). W 2015 r. w elektrowni Hua Neng Changxing (Chiny) uruchomiono instalację o wydajności 630 m³/d, w której do zatężania strumieni odpadowych użyto membranowy proces osmotyczny [30]. Roztwór odbierający uzyskiwany z rozpuszczonych w wodzie NH₃ i CO₂ poddawany jest regeneracji termicznej z wykorzystaniem ciepła odpadowego. To samo źródło energii stosowane jest w krystalizatorach, a odzyskana w nich woda jest wykorzystywana w elektrowni do wytwarzania pary technologicznej. Zaproponowana technologia typu „zero liquid discharge” pozwala na pełny odzysk wody ze ścieków przemysłowych.



Rys. 12. Wykorzystanie wymuszonej osmozy w technologii „zero liquid discharge”
 Fig. 12. Forward osmosis-based zero liquid discharge technology

Inne zastosowania wymuszonej osmozy

Wymuszona osmoza jest obecnie stosowana nie tylko do oczyszczania wody lub ścieków, ale także np. do przygotowywania roztworów nawozów sztucznych stosowanych w rolnictwie. W tym przypadku koncentrat substancji nawozowych, przygotowany w zakładach chemicznych, stanowi roztwór odbierający w przypadku wody ze ścieków lub wody morskiej (rys. 13) [31]. Stężenie rozcieńczonego z wykorzystaniem FO nawozu może być jednak zbyt duże do jego bezpośredniego zastosowania do nawożenia roślin i czasami konieczne jest jego dodatkowe rozcieńczenie czystą wodą. Ponadto istnieje niebezpieczeństwo dyfuzji wstecznej (z roztworu odbierającego do zasilającego) substancji biogennej, co może skutkować eutrofizacją odbiornika. Od dłuższego czasu membrany do wymuszonej osmozy służą także do wytwarzania woreczków zawierających koncentraty napojów [32]. Tego typu produkty wykorzystywane są przez żołnierzy, żeglarzy lub turystów. Koncentraty znajdujące się w woreczkach zawierają głównie cukry oraz sole mineralne. Woreczek z koncentratem wkłada się do dowolnego środowiska wodnego i w wyniku różnicy stężeń następuje osmotyczne rozcieńczenie koncentratu – w efekcie uzyskiwany jest napój gotowy do spożycia. Ponieważ membrana FO stanowi absolutną barierę dla mikroorganizmów i innych substancji organicznych, zatem uzyskany napój może być wypity bez żadnej dodatkowej obróbki.



Rys. 13. Zastosowanie wymuszonej osmozy do przygotowania roztworów nawozów sztucznych
 Fig. 13. Application of forward osmosis to liquid fertilizer preparation

Podsumowanie

Rosnące zainteresowanie procesem wymuszonej osmozy w wielu dziedzinach inżynierii środowiska oraz innych sferach życia wynika z faktu, że proces ten pozwala na odzyskanie wody z roztworów o bardzo różnym składzie, w tym z wód silnie zasolonych lub ze ścieków. Wydaje się, że proces ten w przyszłości będzie stanowił realną alternatywę dla obecnie stosowanych procesów odsalania wody. Aby jednak tak się stało, konieczne jest opracowanie mniej energochłonnych technik regeneracji/odzysku roztworów odbierających, gdyż ten etap całego procesu decyduje o kosztach uzyskania wody.

Praca została sfinansowana z funduszy przeznaczonych na działalność statutową Katedry Technologii Oczyszczania Wody i Ścieków Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej (S50-518).

LITERATURA

1. FAO: Hot Issues: Water Scarcity, 2013.
2. H. du TROCHET: Nouvelles Recherches sur l'Endosmose et l'Exosmose. J.-B. Baillière, Paris 1828.
3. G. W. BATCHELDER: Process for the demineralization of water. US Patent 3,171,799, 1965.
4. D. N. GLEW: Process for liquid recovery and solution concentration. US Patent 3,216,930, 1965.
5. B. S. FRANK: Desalination of sea water. US Patent 3,670,897, 1972.
6. R. E. KRAVATH, J. A. DAVIS: Desalination of seawater by direct osmosis. *Desalination* 1975, Vol. 16, pp. 151–155.
7. K. STACHE: Apparatus for transforming sea water, brackish water, polluted water or the like into a nutritious drink by means of osmosis. US Patent 4,879,030, 1989.
8. Q. GE, M. LING, T. S. CHUNG: Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges, and prospects for the future. *Journal of Membrane Science* 2013, Vol. 442, pp. 225–237.
9. T. Y. CATH: Emerging Applications for Water Treatment and Potable Water Reuse. Proc. of 36th International Conference on Environmental Systems, Norfolk (Virginia) 2006.
10. N. M. MAZLAN, D. PESHEV, A. G. LIVINGSTON: Energy consumption for desalination – a comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 2016, Vol. 377, pp. 138–151.
11. J. R. McCUTCHEON, R. L. MCGINNIS, M. ELIMELECH: A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. *Desalination* 2005, Vol. 174, pp. 1–11.
12. L. CHEKLI, S. PHUNTSO, J. S. KIM, J. KIM, J. Y. CHOI, J.-S. CHOI, S. KIM, J. H. KIM, S. HONG, J. SOHN, H. K. SHON: A comprehensive review of hybrid forward osmosis systems: Performance, applications and future prospects. *Journal of Membrane Science* 2016, Vol. 497, pp. 430–449.
13. M. ELIMELECH: Science and technology for sustainable water supply. Presentation at Your Drinking Water: Challenges and Solutions for the 21st Century, Yale University, Yale 2009.
14. M. M. LING, T.-S. CHUNG: Desalination process using super hydrophilic nanoparticles via forward osmosis integrated with ultra-filtration regeneration. *Desalination* 2011, Vol. 278, pp. 194–202.
15. M. M. LING, K. Y. WANG, T.-S. CHUNG: Highly water-soluble magnetic nanoparticles as novel draw solutes in forward osmosis for water reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2010, Vol. 49, pp. 5869–5876.
16. J. KUCERA: Desalination. Water From Water. Wiley, 2014.
17. www.forwardosmosistech.com/forward-osmosis-membranes.
18. T. Y. CATH, J. E. DREWES, C. D. LUNDIN: A novel hybrid forward osmosis process for drinking water augmentation using impaired water and saline water resources. Water Research Foundation and Arsenic Water Technology Partnership, 2009.
19. R. K. MCGOVERN, J. H. LIENHARD: On the potential of forward osmosis to energetically outperform reverse osmosis desalination. *Journal of Membrane Science* 2014, Vol. 469, pp. 245–250.
20. www.thenational.ae/uae/environment/pilot-uae-desalination-plants-just-months-away-from-full-operation.
21. R. VALLADARES LINARES: Hybrid membrane system for desalination and wastewater treatment integrating forward osmosis and low pressure reverse osmosis. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft 2014.
22. V. YANGALI-QUINTANILLA, Z. LI, R. VALLADARES, Q. LI, G. AMY: Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse. *Desalination* 2011, Vol. 280, pp. 160–166.
23. R. VALLADARES LINARES, Z. LI, V. YANGALI-QUINTANILLA, N. GHAFFOUR, G. AMY, T. LEIKNES, J. S. VROUWENVELDER: Life cycle cost of a hybrid forward osmosis - low pressure reverse osmosis system for seawater desalination and wastewater recovery. *Water Research* 2016, Vol. 88, pp. 225–234.
24. A. ACHILLI, T. Y. CATH, E. A. MARCHAND, A. E. CHILDRESS: The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes. *Desalination* 2009, Vol. 239, pp. 10–21.
25. W. C. LAY, Q. ZHANG, J. ZHANG, D. McDOUGALD, C. TANG, R. WANG, Y. LIU, A. G. FANE: Study of integration of forward osmosis and biological process: Membrane performance under elevated salt environment. *Desalination* 2011, Vol. 283, pp. 123–130.
26. C. Y. TANG: Forward osmosis for desalination and wastewater treatment. Proc. of DSD International Conference, Hong Kong 2014.
27. P. G. NICOLL: Forward osmosis – a brief introduction. Proc. of The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse, Tianjin (China) 2013.
28. www.pbs.org/wgbh/nova/next/tech/forward-osmosis.
29. J. MINIER-MATAR, A. HUSSAIN, A. JANSON, R. WANG, A. G. FANE, S. ADHAM: Application of forward osmosis for reducing volume of produced/process water from oil and gas operations. *Desalination* 2015, Vol. 376, pp. 1–8.
30. http://oasyswater.com/case-study-post/changxing.
31. M. XIE, M. ZHENG, P. COOPER, W. E. PRICE, L. D. NGHIEM, M. ELIMELECH: Osmotic dilution for sustainable greenwall irrigation by liquid fertilizer: Performance and implications. *Journal of Membrane Science* 2015, Vol. 494, pp. 32–38.
32. Hydration Technology Innovations LLC, Personal Desalination and Water Filters (www.htiwater.com/divisions/personal_hydration/index.html).

Kabsch-Korbutowicz, M. Application of Forward Osmosis to Water Desalination and Reuse. *Ochrona Środowiska* 2016, Vol. 38, No. 1, pp. 9–14.

Abstract: Forward osmosis (FO), also known as osmosis, engineered osmosis or manipulated osmosis, is an osmotically driven membrane process. FO utilizes osmotic pressure of a highly concentrated draw solution as a driving force to transfer water from a feed solution to the draw solution through a dense polymeric membrane. Depending on the concentration of solutes in the feed and the intended use of the product, this stage may

be the only process required. In most cases however, a complete FO system utilizing the forward osmosis contains a subsequent step for the draw solute regeneration to finally produce a clean water. Potential advantages of FO over classical desalination processes include its low fouling intensity, low energy consumption, higher salt rejection and higher water flux. It attracts growing attention as separation process in wastewater treatment, food processing, and seawater/brackish water desalination.

Keywords: Membrane, water reclamation, osmotic gradient, seawater, wastewater.