

Aleksandra KLIMONDA, Izabela KOWALSKA\*

## **ZASTOSOWANIE TECHNIK MEMBRANOWYCH DO ODSALANIA WÓD KOPALNIANYCH**

Wody słone i słonawe są coraz częściej wykorzystywane do zaopatrywania ludności i przemysłu w wodę. Na rynku odsalania dominują techniki membranowe. W niniejszej pracy dokonano przeglądu technik membranowych mających zastosowanie w procesach odsalania wód kopalnianych. Omówiono podstawy procesów separacji membranowej mających największe znaczenie gospodarcze – odwróconej osmozy i elektrodializy oraz przedstawiono przykłady aplikacji procesów membranowych w instalacjach odsalania wód dołowych w Polsce oraz koncepcje instalacji opartych na technikach membranowych. Przykłady zostały omówione zarówno pod kątem technologicznym, jak i ekonomicznym.

### **1. WSTĘP**

Zrzut wód kopalnianych do naturalnych odbiorników wodnych niesie za sobą konsekwencje zarówno ekologiczne, jak i gospodarcze. Wprowadzenie do rzek silnie zmineralizowanych wód dołowych, powoduje ich zasolenie, co skutkuje zaburzeniem równowagi środowiska wodnego – między innymi przyczynia się do degradacji populacji mikroorganizmów odpowiedzialnych za procesy samooczyszczania wód. Kolejną konsekwencją zasolenia wód w rzekach jest uniemożliwienie wykorzystania tych rzek jako źródeł wód powierzchniowych do zaopatrzenia ludności i przemysłu w wodę. Wiąże się to z poniesieniem dużych kosztów uzdatniania wody. Zważając na fakt, iż zasoby wody są ograniczone, a jej zużycie coraz większe, wszelkie działania mające na celu ochronę zasobów wodnych na Ziemi są bardzo ważne. Odsalanie wód dołowych niesie za sobą

---

\* Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, [aleksandra.klimonda@student.pwr.edu.pl](mailto:aleksandra.klimonda@student.pwr.edu.pl).

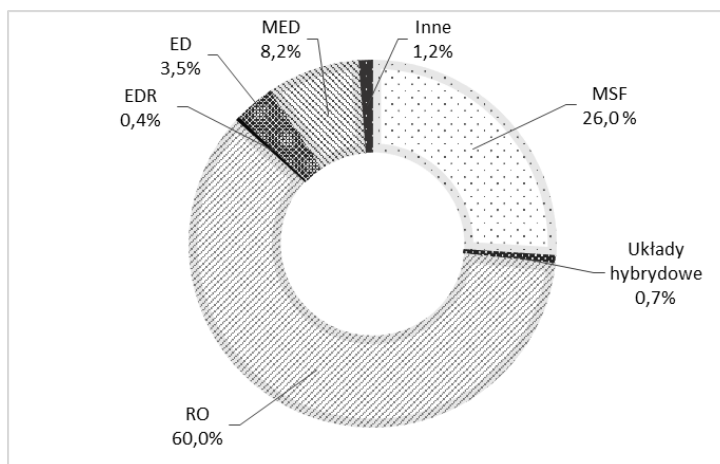
korzyści związane z ochroną odbiorników, ale także, co istotne pod względem finansowym - daje możliwość pozyskania źródeł wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz na cele przemysłowe.

W Polsce problem związany z odprowadzaniem wód dołowych do cieków powierzchniowych jest szczególnie poważny, gdyż gospodarka energetyczna kraju opiera się na górnictwie węgla kamiennego i brunatnego, a intensywnemu wydobyciu tych surowców towarzyszy odprowadzanie z drenowanych górotworów znacznych ilości wód kopalnianych (tabela 1) [8]. Położenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w zlewni dwóch największych rzek w Polsce w ich początkowych biegach powoduje że zrzut dużych ilości zasolonych wód dołowych z tego rejonu wpływa na złą jakość wody nie tylko w miejscach zrzutu, ale również w dalszych odcinkach rzek.

Tabela 1. Odprowadzanie ścieków z górnictwa węgla kamiennego do wód powierzchniowych [8]

Rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Zrzut wód dołowych [m <sup>3</sup> /min]	372,2	375,0	379,7	375,6	363,7	369,9	400,5
Zasolenie Cl <sup>-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [tys. ton]	1361	1440	1526	1453	1290	1383	1474

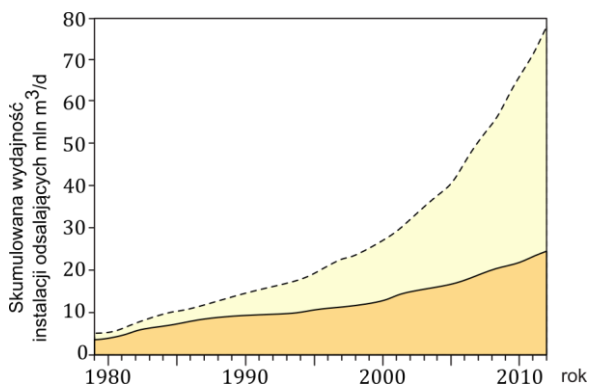
W celu ograniczenia szkód związanych ze zrzutem wód dołowych do rzek, należy poddać je procesowi odsalania. Najważniejsze znaczenie w otrzymywaniu wody do picia i na potrzeby gospodarcze mają procesy separacji oparte na metodach termicznych i na metodach membranowych [5]. Ze względu na niższe zużycie energii w porównaniu do technik termicznych, na rynku odsalania dominują techniki membranowe (rys. 1) [1, 2, 5].



Rys. 1. Rynek odsalania (rok 2012) z uwzględnieniem stosowanych metod. RO: odwrócona osmoza, ED: elektrodializa, EDR: elektrodializa odwracalna, MED: odparowanie wielokrotne, MSF: wielostopniowa destylacja równowagowa [wg 1]

Szacowane koszty odsolenia 1 m<sup>3</sup> wody słonej z uwzględnieniem kosztów inwestycyjnych, ceny energii elektrycznej oraz ciepłej, kosztu zakupu membran, chemikaliów oraz zatrudnienia obsługi wynoszą kolejno: 0,76 USD w procesie RO, 0,83 USD w procesie MED oraz 1,07 USD w instalacji MSF [2, 10].

W ciągu ubiegłych 35 lat odnotowano duży wzrost wydajności instalacji odsalających na świecie, zarówno wykorzystujących metody termiczne, jak i membranowe (rys. 2).



Rys. 2. Rozwój wydajności termicznych i membranowych instalacji odsalania w latach 1980–2012, ciemny– metody termiczne, jasny– metody membranowe [wg 14]

Za intensywny wzrost liczby instalacji stosujących membranowe metody odsalania po roku 2000 odpowiada ulepszenie dostępnych technologii, a także obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych tych systemów [14] – na rynku pojawiają się moduły o coraz większych powierzchniach membran, pracujące przy coraz niższych ciśnieniach [3]. W roku 2007 całkowita wydajność instalacji odsalających wynosiła 47,6 mln m<sup>3</sup>/d, w 2008 – 58 mln m<sup>3</sup>/d, w 2011 roku wzrosła do 65,2 mln m<sup>3</sup>/d, w roku 2012 – 74,8 mln m<sup>3</sup>/d, zaś na rok 2015 szacowana była wydajność 97,5 mln m<sup>3</sup>/d [2, 10]. W odniesieniu do całkowitej wydajności instalacji odsalających na świecie, odsalanie wody morskiej stanowi 60% tej wydajności, natomiast wód słonawych – 21% [2].

## 2. TECHNIKI MEMBRANOWE STOSOWANE DO ODSALANIA WÓD SŁONAWYCH

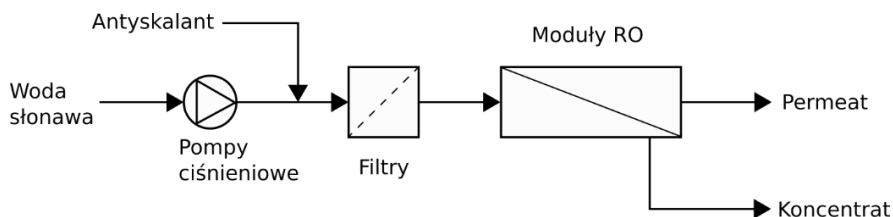
Procesami membranowymi stosowanymi do odsalania wód kopalnianych o największym znaczeniu gospodarczym są odwrócona osmoza i elektrodializa. Do procesów o mniejszym znaczeniu gospodarczym bądź będących w fazie badań zaliczane są elektrodializa odwracalna, nanofiltracja, dializa Donnana oraz destylacja membranowa [4].

Odwrócona osmoza jest najczęściej stosowanym procesem membranowym do odsalania wód. W procesie tym siłą napędową jest różnica ciśnień ( $\Delta P$ ) po obu stronach membrany. Membrany wykorzystywane do RO są przepuszczalne dla wody, nie przepuszczają zaś soli; charakteryzują się strukturą nieporowatą, w związku z czym ich oporność hydrauliczna jest wysoka i wymagane jest zastosowanie wysokiego ciśnienia transmembranowego – przy odsalaniu wody słonawej wymagane jest ciśnienie transmembranowe rzędu 2 MPa [5].

Typowy układ technologiczny odsalania wód słonawych (rys. 3) w procesie RO obejmuje wstępne oczyszczanie wody, które stosowane jest w celu ochrony systemu membranowego przed foulingiem (zjawiskiem blokowania powierzchni i/lub porów membrany) oraz przedłużenia żywotności membran [5, 6]. Wstępne oczyszczanie zwykle obejmuje dawkowanie kwasów oraz antyskalantów (długołańcuchowych polimerów) do ochrony membran RO przed wytrąceniem osadów mineralnych [6, 12] oraz filtrację pośpieszną stosowaną do usunięcia z wody substancji zawieszonych. Odsalanie zachodzi na modułach RO pracujących w układach jedno-, dwu- i trójstopniowych. Do odsalania wód słonawych stosuje się instalacje jednostopniowe, natomiast dla wód o wyższym zasoleniu, stosowane są układy dwu- i trójstopniowe [6].

Permeat z procesu RO ze względu na niską mineralizację nie spełnia standardów wody do picia, dlatego wymagane jest końcowe uzdatnianie wody odsolonej [5]. W celu zwiększenia zawartości substancji rozpuszczonych w permeacie, miesza się strumień permeatu z pewną częścią wody przed procesem odsalania.

Woda, która ma być przeznaczona do picia i na potrzeby gospodarcze powinna być poddana korekcie pH i chlorowaniu [5].



Rys. 3. Układ technologiczny odsalania wód słonawych w procesie RO [wg 5, 7]

Drugim procesem membranowy mającym znaczenie gospodarcze, choć znacznie rzadziej stosowanym jest elektrodializa. ED stanowi membranową technikę rozdzielania składników roztworów ciekłych, w której wykorzystuje się transport jonów przez membrany zachodzący pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego [5, 6].

W procesie elektrodializy stosowane są membrany wykonane z żywicy jonowymiennych, które umożliwiają transport jonów o odpowiednich ładunkach – membrany anionowymienne przepuszczają tylko aniony, zaś kationowymienne – wyłącznie kationy [12]. Membrany jonoselektywne umieszczane są w polu elektrycznym w postaci stosów

elektrodialitycznych. Stosy składają się z kilkuset membran zainstalowanych równolegle. Membrany kationo- i anionowymienne oddzielone są przekładkami dystansującymi, tworząc komory o grubości ok. 1 mm. Membrany jonowymienne ułożone naprzemiennie dzielą elektrodializer na komory odsalania i zateżniania roztworu [5, 12]. Elektrody znajdują się na końcach stosu membranowego w pojedynczych komorach, zwanych komorami elektrodowymi.

Pod wpływem pola elektrycznego jony migrują w kierunku odpowiednich elektrod. Membrany selektywnie je zatrzymują lub przepuszczają, rozdzielając strumień nadawy na koncentrat zawierający sól oraz roztwór odsolony [5].

Wstępne oczyszczanie wody przed procesem ED polega na dawkowaniu kwasów lub polifosforanów w celu zapobiegania wytrącania się osadów na membranach oraz usunięcia substancji nie ulegających jonizacji (krzemionki, bakterii, rozpuszczonych związków organicznych) [5]. Ograniczenie wstępnego oczyszczania możliwe jest przy zastosowaniu elektrodializy odwracalnej [1, 12]. Metoda ta polega na zmianie kierunku przepływu prądu co kilkanaście minut, co wpływa na zmianę ruchu jonów, w efekcie czego komory zateżniania stają się komorami odsalania i na odwrót. Dzięki temu usuwane są koloidy i świeżo wytrącane osady, co zapobiega blokowaniu membran. Elektrodializa odwracalna wydłuża czas eksploatacji membran i ogranicza koszty prowadzenia procesu, umożliwiając jednocześnie zastosowania elektrodializy dla wód bardziej zanieczyszczonych [5].

Woda po procesie ED nie wymaga końcowego uzdatniania poza dezynfekcją. Jeśli w trakcie wstępnego przygotowania wody surowej użyto kwasu, należy wodę przywrócić do stanu równowagi węglanowo-wapniowej [12].

### 3. INSTALACJE I KONCEPCJE INSTALACJI DO ODSALANIA WÓD KOPALNIANYCH

#### 3.1. STACJA UZDATNIANIA WODY DOŁOWEJ PRZY KWK „POKÓJ”

Stacja Uzdatniania Wody Dołowej (SUWD) KWK „Pokój” w Rudzie Śląskiej eksploatowana jest od 2000 roku [11]. Stacja zlokalizowana jest na terenie kopalni przy istniejących stawach osadowych [5]. Uzdatniana woda jest ujmowana w ilości 1600–1700 m<sup>3</sup>/d z poziomu 450 m z likwidowanego rejonu „Wawel”. Układ technologiczny składa się m.in. z filtrów żwirowych ze złożem katalitycznym, filtrów dokładnych oraz ze stacji odwróconej osmozy, gdzie usuwany jest nadmiar jonów siarczanych, wapniowych i magnezowych [5, 11]. Woda po procesie RO mieszana jest z wodą surową w celu zwiększenia zawartości składników mineralnych, których stopień usunięcia w procesie RO dochodzi nawet do 100%. Parametry wody surowej, wody po

procesie odwróconej osmozy, a także po wymieszaniu wody surowej z wodą po RO przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład wody surowej oraz z poszczególnych stopni uzdatniania w kopalni „Pokój” [5]

Parametr	Woda surowa	Woda po RO	Woda do picia
Przewodność, $\mu\text{S}/\text{cm}$	3550	59	185,5
Twardość, $\text{g CaCO}_3/\text{m}^3$	2565	8,35	7,25
Siarczany, $\text{g SO}_4^{2-}/\text{m}^3$	2070	< 10	17,73
Chlorki, $\text{g Cl}^-/\text{m}^3$	60,62	8,86	85,4
Wapń, $\text{g Ca}^{2+}/\text{m}^3$	499,0	1,88	21,75
Magnez, $\text{g Mg}^{2+}/\text{m}^3$	320,8	0,89	18,46
Substancje rozpuszczone, $\text{g}/\text{m}^3$	3590	32,0	127,0

Uzdatniona woda przeznaczana jest do spożycia jako woda zasilająca sieć kopalnianą, co pozwala na ograniczenie, bądź w przyszłości – na wyeliminowanie dostaw do kopalni wody z sieci wodociągowej. Koszt produkcji  $1 \text{ m}^3$  wody do picia w SUWD KWK „Pokój” wynosi 3,98 zł, natomiast przy zakupie wody z sieci komunalnej  $1 \text{ m}^3$  kosztuje kopalnię 5,66 zł/ $\text{m}^3$  [11]. Różnica pomiędzy kosztami wody otrzymywanej w procesie RO a jej zakupu z sieci komunalnej pozwala kopalni zaoszczędzić około 100 000 zł rocznie. Ponadto, dzięki zmniejszeniu zrztu zasolonych wód dołowych do odbiorników naturalnych, a co za tym idzie zmniejszeniu wydatków związanych z opłatami ponoszonymi za wprowadzanie ładunków soli do rzeki, kopalnia oszczędza około 400 000 zł rocznie. Zatem sumaryczny zysk KWK „Pokój” wynosi około pół miliona złotych rocznie [15].

W wyniku działalności SUWD KWK „Pokój” zrzt ładunku jonów chlorkowych i siarczanowych do odbiornika – rzeki Czerniawki został zmniejszony o 3,52 t/d, co stanowi spadek o około 24% względem ładunku jonów zrzuconych przed uruchomieniem zakładu [5].

### 3.2. KONCEPCJA INSTALACJI PRZY KWK „WESOŁA”

Dla kopalni węgla kamiennego KWK „Wesoła” została opracowana koncepcja instalacji odsalania wód dołowych oparta na układzie hybrydowym: elektrodializa–nanofiltracja–metody wyparne. Oprócz odsalania wód kopalnianych, działalność zakładu obejmować ma również produkcję soli warzonej [17].

W zależności od poziomu wydobycia, tym samym od zasolenia (tab. 3), wody trafiają do dwóch ciągów technologicznych. Woda z poziomu 665 m o stężeniu jonów chlorkowych wynoszącym  $35,5 \text{ g}/\text{dm}^3$  poddawana jest procesowi nanofiltracji z wykorzystaniem membran Osmonics Desal 5-L charakteryzujących się niską retencją NaCl, przy jednocześnie wysokim poziomie zatrzymania kationów wapnia i magnezu oraz anionów siarczanowych.

Tabela 3. Ilość i zasolenie wód dołowych z KWK „Wesoła” z podziałem na poziomy wydobycia [9]

Poziom, m	Dopływ, m <sup>3</sup> /d	Stężenie, g/dm <sup>3</sup>		Ładunek Cl <sup>-</sup> i SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	t/rok	Udział, %
230	3600	0,10	0,300	525,6	1,1
465	7100	2,25	0,524	7188,8	15,1
665	3050	35,50	0,408	39974,6	83,8
Razem	13750	-	-	47689,0	100,0

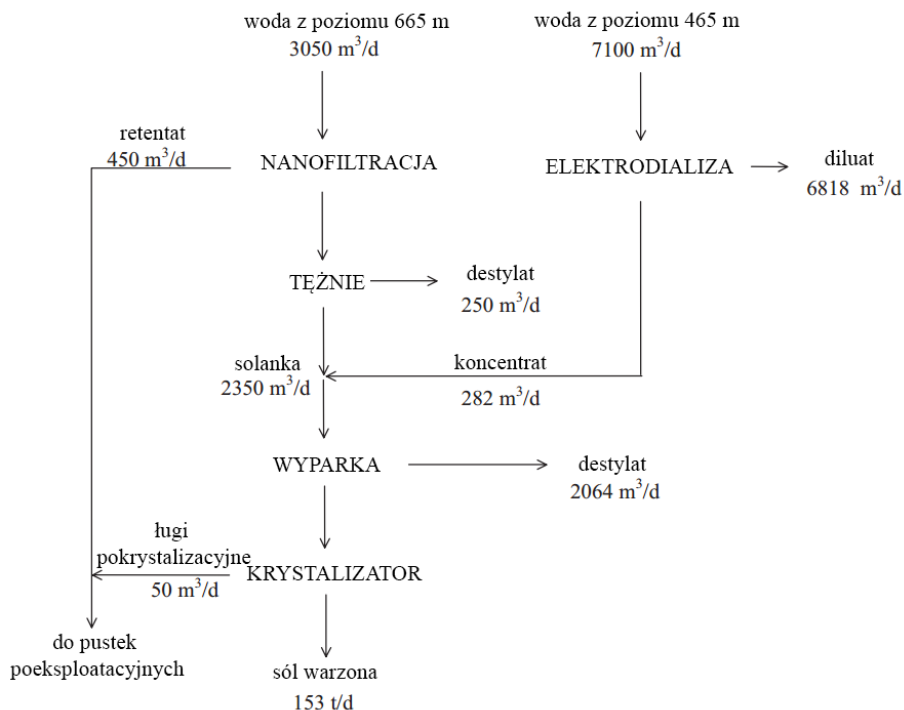
Po procesie nanofiltracji, woda jest zatężana w tężniach, skąd odbierane są dwa strumienie: destylat w ilości 250 m<sup>3</sup>/d oraz solanka w ilości 2350 m<sup>3</sup>/d. Parametry poszczególnych strumieni procesu nanofiltracji zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Skład strumieni w procesie NF z 85% odzyskiem wody [9]

Strumień	Stężenie, g/dm <sup>3</sup>			
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
Nadawa	1,52	0,899	0,41	35,45
Permeat	0,80	0,44	0,01	33,87
Retentat	5,61	3,50	2,64	44,33

Woda dołowa z poziomu 456 m odsalana jest w procesie ED, w wyniku którego produkowane jest około 6800 m<sup>3</sup>/d diluatu o stężeniu anionów chlorkowych i siarczanowych zbliżonym do ich stężenia w wodzie pochodzącej z poziomu 280 m, a także 280 m<sup>3</sup>/d koncentratu, który łączony jest z solanką powstałą w procesie nanofiltracji. Koncentrat z ED wraz z solanką z NF poddawany jest procesowi zatężania. Z wyparki odprowadzany jest destylat i solanka o stężeniu NaCl wynoszącym 300 kg/m<sup>3</sup>, która kierowana jest do krystalizatora w celu dalszego zatężania z pozyskiwaniem soli warzonej [9,17]. Schemat instalacji przedstawiono na rys. 4.

Oprócz oczywistych pozytywnych aspektów zastosowania wyżej opisanej instalacji utylizacji wód kopalnianych związanych z ekologią, ważnym czynnikiem jest efektywność ekonomiczna. Szacowany zysk ze sprzedaży soli może wynosić nawet 1,68 mln USD rocznie (przy założeniu ceny soli 30 USD/t) i jest porównywalny z kosztami ponoszonymi przez kopalnię na utylizację wód dołowych (1,71 mln USD rocznie). Biorąc pod uwagę fakt, że kopalnia nie będzie ponosić opłat za zrzut ładunku chlorków i siarczanów do rzeki, szacuje się że roczny zysk wyniesie 3,45 mln USD [9].



Rys. 4. Schemat instalacji dla KWK „Wesoła” [wg 9]

### 3.3. KONCEPCJA INSTALACJI PRZY KOPALNI GROOTVLEI

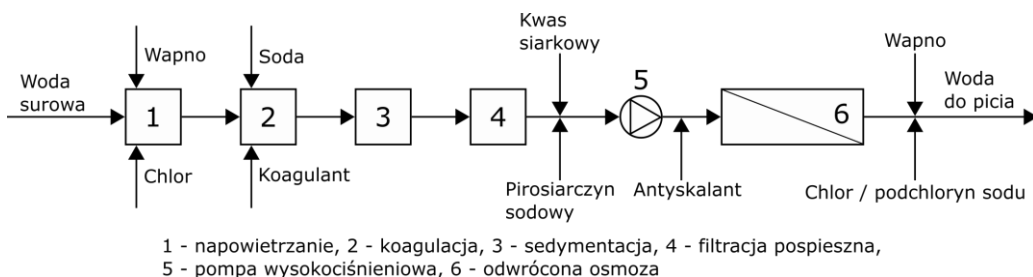
Z kopalni złota Grootvlei w RPA wyłaczane jest średnio 80–100 tys. m<sup>3</sup> wód dołowych w ciągu doby, które trafiają do rzeki Blesbokspruit. Zawartość substancji rozpuszczonych w wodach pochodzących z tej kopalni zawiera się w przedziale 2700–3800 g/m<sup>3</sup>, dodatkowo wody te charakteryzują się wysoką zawartością żelaza (150–300 g/m<sup>3</sup>), manganu (8 g/m<sup>3</sup>), siarczanów (1700–2300 g/m<sup>3</sup>), chlorków (190–240 g/m<sup>3</sup>), a także wapnia (240–340 g/m<sup>3</sup>), magnezu (150–200 g/m<sup>3</sup>) i sodu (270–320 g/m<sup>3</sup>) [16]. Ze względu na zasolenie rzeki będącej jednym z głównych zasobów wodnych tego rejonu, Schoeman i Steyn [16] opracowali dwie koncepcje odsalania wód dołowych z kopalni Grootvlei w oparciu o procesy RO i EDR.

Schemat instalacji odsalania z wykorzystaniem procesu RO został przedstawiony na rys. 5. Wstępne oczyszczanie wody dołowej przed modułami RO rozpoczyna się procesem napowietrzania wspomaganym chlorowaniem, w celu utlenienia jonów żelaza (II) do jonów żelaza (III). Następnie do wody dawkuje się wapno i soda. Zastosowanie tych chemikaliów umożliwia wytrącenie wapnia w postaci węglanu wapnia. Dodatkowo, dawki sodu umożliwia strącanie żelaza, manganu i glinu oraz pozwala



obniżyć stężenie baru i krzemionki. W dalszym etapie oczyszczania zaproponowano koagulację, sedymentację, a następnie filtrację na filtrach piaskowych oraz korektę odczynu wody kwasem siarkowym do wartości  $\text{pH} = 7,5\text{--}8,0$ .

Odsalanie na modułach RO zostało poprzedzone dawkowaniem antyskalantów. Do procesu odsalania przy zastosowaniu odwróconej osmozy założono wykorzystanie spiralnych modułów membranowych. Po odsoleniu na modułach RO, woda ma być poddawana końcowemu uzdatnieniu, które polegać ma na korekcie  $\text{pH}$  poprzez dawkowanie wapna oraz na dezynfekcji podchlorynem sodu bądź chlorem.



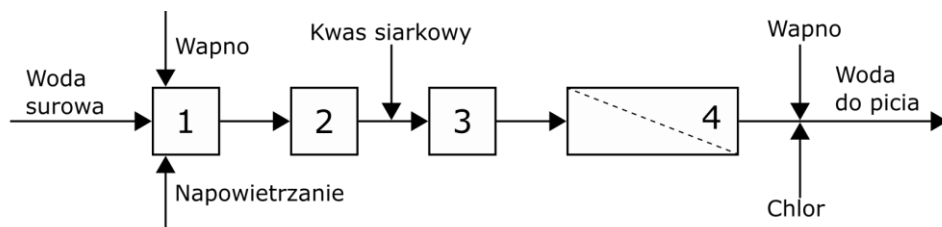
Rys. 5. Uproszczony schemat odsalania wód dołowych z kopalni Grootvlei w procesie RO [wg 16]

W tabeli 5 zestawiono skład strumieni procesowych w projektowanej instalacji. Oszacowano, że proces pozwoli na 97,8% obniżenie stężenia substancji rozpuszczonych, stopień obniżenia stężenia siarczanów wyniesie 98,3%, chlorków – 94,4%, wapnia – 98,4%, a magnezu – 98,2%.

Tabela 5. Skład strumieni procesowych w instalacji z RO [16]

Parametr	Nadawa	Permeat	Koncentrat
Siarczany, g $\text{SO}_4^{2-}/\text{m}^3$	2887,0	49,0	16920,0
Chlorki, g $\text{Cl}/\text{m}^3$	272,0	14,0	2838,0
Wapń, g $\text{Ca}^{2+}/\text{m}^3$	49,0	0,8	326,0
Magnez, g $\text{Mg}^{2+}/\text{m}^3$	11,0	0,2	73,0
Substancje rozpuszczone, g/ $\text{m}^3$	4920,0	113,0	32590,0

Do odsalania wód dołowych z kopalni Grootvlei zaproponowano także układ oparty na instalacji EDR (rys. 6) [16]. Wstępne przygotowanie wody przed instalacją EDR polega na obniżeniu stężenia magnezu, żelaza, glinu i manganu w procesie napowietrzania poprzedzonego alkalizacją wapnem, a następnie obejmuje filtrację i korektę  $\text{pH}$  przy użyciu kwasu siarkowego. Końcowe uzdatnianie strumienia wody po EDR polega na korekcie  $\text{pH}$  poprzez dawkowanie wapna oraz na dezynfekcji przy użyciu chloru. Skuteczność procesu zestawiono w tab. 6.



1 - wstępne oczyszczanie, 2 - filtracja pospieszna, 3 - podgrzewanie, 4 - instalacja EDR

Rys. 6. Uproszczony schemat odsalania wód dołowych z kopalni Grootvlei w procesie EDR [wg 16]

Tabela 6. Skład strumieni procesowych w instalacjach opartych na EDR [16]

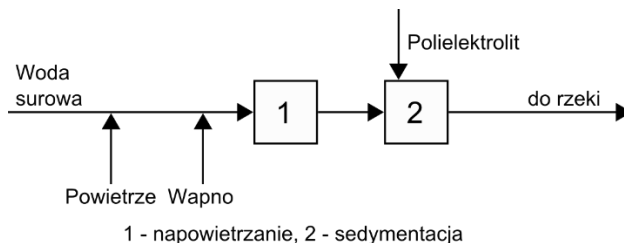
Parametr	T= 25°C, proces dwustopniowy			T = 35°C, proces czterostopniowy		
	Nadawa	Permeat	Koncentrat	Nadawa	Permeat	Koncentrat
Siarczany, g SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /m <sup>3</sup>	2660,0	943,5	6665,1	2660,0	207,4	7214,8
Chlorki, g Cl/m <sup>3</sup>	287,0	116,5	684,9	287,0	30,1	764,0
Wapń, g Ca <sup>2+</sup> /m <sup>3</sup>	650,0	211,3	1673,6	650,0	44,6	1774,3
Magnez, g Mg <sup>2+</sup> /m <sup>3</sup>	200,0	73,9	494,4	200,0	16,0	541,8
Substancje rozp., g/m <sup>3</sup>	4178,0	1519,1	10382,2	4178,0	245,5	11295,4

W procesie EDR, stopnie usunięcia zanieczyszczeń były następujące: 94,1% dla substancji rozpuszczonych, dla siarczanów – 92,2%, w przypadku chlorków – 89,5%, stężenie kationów wapniowych zostało obniżone o 93,1%, a kationów magnezowych – 92,0%.

W przypadku RO, koszty inwestycyjne oszacowano na 31,8 mln USD (13,9 mln USD wstępne oczyszczanie, 17,9 mln USD odsalanie), zaś koszty produkcji wody – na 0,88 USD/m<sup>3</sup>.

Instalacja oparta na EDR charakteryzuje się wyższymi kosztami inwestycyjnymi – 53,3 mln USD (50% wstępne oczyszczanie), jednak koszty eksploatacyjne są niższe – koszt produkcji 1 m<sup>3</sup> wody wynosi 0,47 USD/m<sup>3</sup>. W porównaniu do kosztu produkcji 1 m<sup>3</sup> wody w procesie RO, w wariantcie konkurencyjnym, koszt ten jest o 55% niższy, a skuteczność odsalania porównywalna.

Wykorzystanie obu wariantów skutkowało osiągnięciem oczekiwanego składu permeatu, jednak ze względu na niższe koszty eksploatacyjne autorzy rekomendowali wariant z wykorzystaniem EDR. Pomimo zaawansowania prac koncepcyjnych, stacja odsalania wody dołowej przy kopalni Grootvlei Proprietary Mines Ltd nie została uruchomiona, a eksploatowany układ oczyszczania obejmuje napowietrzanie, wapnowanie oraz sedymentację (rys. 7). Zastosowany układ pozwala na obniżenie zawartości żelaza i manganu, nie zmienia jednak zasolenia, czego skutkiem jest odprowadzanie dużych ładunków soli do rzeki Blesbokspruit [13].



Rys. 7. Uproszczony schemat oczyszczania wód dołowych z kopalni Grootvlei [wg 13]

#### 4. PODSUMOWANIE

Techniki membranowe są z powodzeniem stosowane w wielu instalacjach do odsalania wód kopalnianych, a działające w Polsce i na świecie obiekty są przykładami i wzorami dla kolejnych planowanych inwestycji. Doświadczenia nabyte podczas projektowania i eksploatacji systemów odsalania wód kopalnianych będą w przyszłości pomocne w realizacji kolejnych tego typu projektów.

Rynek membranowych technik odsalania wód słonawych zdominowany jest przez instalacje wykorzystujące proces odwróconej osmozy oraz elektrodializy ze względu na niskie koszty odsalania oraz dostępną szeroką gamę produktów oferowanych przez producentów. Rozwój technologii separacji membranowej skutkuje obniżeniem kosztów eksploatacyjnych oraz coraz lepszymi parametrami membran. W związku z powyższym, w najbliższych latach utrzymana będzie obecna tendencja wzrostowa wydajności instalacji odsalania zarówno wód słonawych, jak i słonych.

#### LITERATURA

- [1] AMY G.L., GHAFFOR N., *Technical review of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability*, Desalination, 2013, Vol. 309, 197–207.
- [2] BENNET A., *Desalination: 50 years of progress*, Filtration + Separation, 2013, Vol. 50, 32–39.
- [3] BENNET A., *Cost effective desalination: Innovation continues to lower desalination costs*, Filtration + Separation, 2011, Vol. 24, 24–27.
- [4] BOBIK M., LABUS K., *Metody odsalania wód kopalnianych w praktyce – stan obecny technologii i nowe wyzwania*, Przegląd Górniczy, 2014, No. 4, 99–105.
- [5] BODZEK M., KONIECZNY K., *Usuwanie zanieczyszczeń nieorganicznych ze środowiska wodnego metodami membranowymi*, Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2011.
- [6] BODZEK M., BOHDZIEWICZ J., KONIECZNY K., *Techniki Membranowe w Ochronie Środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [7] BOYSEN B., HENTHORNE L., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment*, Desalination, 2015, Vol. 356, 129–139.

- [8] DULEWSKI J., WALTER A., *Gospodarka wodami kopalnianymi w górnictwie węgla brunatnego na tle całego przemysłu wydobywczego*, Warsztaty z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie, Katowice 2007, 29–38.
- [9] DYDO P., SURMA A., TUREK M., *Zero discharge utilization of saline water from “Wesola” coal-mine*, *Desalination*, 2005, Vol. 185, 275–280.
- [10] GUDE V.G., *Desalination and sustainability – an appraisal and current perspective*, *Water Research*, 2016, Vol. 89, 87–106.
- [11] KORCZAK K., KOROL J., *Wykorzystanie wód zasolonych do produkcji wody pitnej – studium przypadku*, *Biuletyn Wdrożeń Czystszej Produkcji*, 2013, Vol. 52, 3–4.
- [12] KOWAL A.L., ŚWIDERSKA-BRÓŹ M., *Oczyszczanie wody*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [13] LEA I., MERWE W., *Towards sustainable mine water treatment at Grootvlei mine*, 8<sup>th</sup> International Mine Water Association Congress, Johannesburg, 2003.
- [14] LI F., LIKHACHEV D.S., *Large-scale water desalination methods: a review and the perspectives*, *Desalination and Water Treatment*, 2013, Vol. 51, 2836–2849.
- [15] MAGDZIORZ A., SEWERYŃSKI J., *The use of membrane technic in mineralised water treatment for drinking and domestic purposes at “Pokoj” coal mine district under liquidation*, 7<sup>th</sup> International Mine Water Association Congress, Ustroń 2000.
- [16] SCHOEMAN J., STEYN A., *Investigation into alternative water treatment technologies for the treatment of underground mine water discharged by Grootvlei Proprietary Mines Ltd into the Blesbokspruit in South Africa*, *Desalination*, 2001, Vol. 133, , 13–30.
- [17] TUREK M., *Odsalanie wód powierzchniowych i podziemnych*, *Wodociągi i Kanalizacja*, 2007, No. 4, 42–45.

#### THE USE OF MEMBRANE TECHNOLOGY IN BRACKISH WATER DESALINATION

Seawater and saline brackish water are being used for municipal and industrial water supplies. The global market of desalination is dominated by membrane techniques – mainly by reverse osmosis. This paper contains basic theory of membrane techniques used for brackish water desalination – reverse osmosis and electro dialysis. In the study there is also included examples of application of the membrane processes in working desalination plants and examples of conceptions of using membrane separation techniques for saline water desalination. Examples has been described in terms of technology and economics.