

Wstępne uzdatnianie wody zasilającej instalacje membranowe w układach przygotowania wody zdemineralizowanej i wody do uzupełniania obiegów ciepłowniczych

Preliminary treatment of water feeding membrane installations in systems for preparing demineralized water and water for making up heating circuits

MARCIN KŁOS, DOROTA SĄKOL, JOLANTA GUMIŃSKA

DOI 10.36119/15.2024.3.1

Zastosowanie technik membranowych w przygotowaniu wód uzupełniających obiegi chłodnicze i wodno – parowe staje się już standardowym rozwiązaniem. Jest to spowodowane przede wszystkim rosnącymi wymogami w zakresie ograniczenia zasolenia odprowadzanych ścieków, co w wielu przypadkach eliminuje możliwość zastosowania tradycyjnego procesu wymiany jonowej. Efektywność technologiczna i ekonomiczna działania układów membranowych w głównej mierze uzależniona jest od jakości wody zasilającej membrany. Dlatego też systemy wstępnego uzdatniania wody zasilającej instalacje membranowe powinny być projektowane i eksploatowane w taki sposób, aby uzyskać jak najlepsze parametry jakościowe mające bezpośredni wpływ na skuteczność działania i żywotność membran. W praktyce sprowadza się to do usuwania z wody surowej substancji powodujących tzw. fouling membran do odwróconej osmozy. Do najpowszechniej spotykanych tego typu substancji należą związki organiczne wchodzące w skład tzw. Naturalnej Materii Organicznej (NMO) oraz mikrozwiesiny i związki koloidalne. Najbardziej efektywną metodą ich usuwania jest koagulacja. Jednak sposób realizacji koagulacji zależy od formy związków organicznych oraz ich podatności na sorpcję i strącanie. W artykule przedstawiono efekty implementacji procesu koagulacji zmiatającej w układzie wstępnego uzdatniania wody zasilającej instalacje membranowe w układach przygotowania wody zdemineralizowanej i wody do uzupełniania obiegów ciepłowniczych w zrealizowanym obiekcie.

Słowa kluczowe: ciepłownictwo, woda uzupełniająca, demineralizacja, koagulacja, uzdatnianie wstępne

The use of membrane techniques in the preparation of water supplementing cooling and water-steam cycles is becoming a standard solution. This is primarily due to the increasing requirements to reduce the salinity of discharged sewage, which in many cases eliminates the possibility of using the traditional ion exchange process. The technological and economic efficiency of membrane systems operation mainly depends on the quality of water feeding the membranes. Therefore, pre-treatment systems for water supplying membrane installations should be designed and operated in such a way as to obtain the best possible quality parameters that have a direct impact on the effectiveness and service life of the membranes. In practice, this involves removing substances from raw water that cause the so-called fouling of osmotic membranes. The most common substances of this type include organic compounds included in the so-called Natural Organic Matter (NMO) and microsusensions and colloidal compounds. The most effective method of removing them is coagulation. However, the method of coagulation depends on the form of organic compounds and their susceptibility to sorption and precipitation. The article presents the effects of implementing the sweep coagulation process in the pre-treatment system for water supplying membrane installations in systems for preparing demineralized water and water for supplementing heating circuits in the completed facility.

Keywords: district heating, make-up water, demineralization, coagulation, pretreatment

dr hab. inż. Marcin Kłos, profesor Politechniki Śląskiej – Hidrofilt sp. z o.o., Gliwice; Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <https://orcid.org/0000-0002-3277-4145>

dr inż. Dorota Sąkol – Sikora – TAURON Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Łagisza w Będzinie

dr hab. inż. Jolanta Gumińska, profesor Politechniki Śląskiej – Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <https://orcid.org/0000-0002-2625-0257>

Adres do korespondencji / Corresponding author: e-mail:marcin.klos@polsl.pl

Wstęp

Stosowanie technik membranowych wiąże się z właściwym przygotowaniem wody zasilającej instalację membranową oraz staranną ich eksploatacją dla utrzymania jakości i wydajności permeatu. Technika odwróconej osmozy podczas uzdatniania wód prowadzi zwykle do „odsoleń” wody tj. usunięcia z wody części lub prawie całości rozpuszczonych w niej soli, związków organicznych oraz bakterii, wirusów, zarodników pleśni i grzybów. Celem odsalania wody jest zapewnienie odpowiedniej jakości wody do zasilania kotłów, czy też do układów chłodzenia. Woda zasilająca moduły membranowe powinna spełniać wymagania określone przez producenta membran.

Nieodłącznym elementem procesów membranowych jest obniżanie ich wydajności związane z akumulacją substancji organicznej bądź nieorganicznej na powierzchni membrany, zwane foulingiem [1,2,3]. Substancje wywołujące fouling można podzielić na dwie kategorie:

1. cząstki stałe oraz koloidy organiczne i nieorganiczne,
2. substancje rozpuszczone mało – i wielkocząsteczkowe, w tym:
 - substancje organiczne (wielkocząsteczkowe – białka, węglowodany, oleje i tłuszcze oraz inne),
 - substancje nieorganiczne krystaliczne (sole wapnia i magnezu, będące prekursorami tzw. zjawiska „scalingu”),
 - substancje biologiczne – mikroorganizmy: bakterie, glony i grzyby, powodujące tzw. „biofouling”.

Wymienione substancje powodują powstawanie, oprócz oporu samej membrany, dodatkowych oporów w stosunku do transportu poszczególnych składników roztworu. Do najważniejszych czynników odpowiedzialnych za spadek wydajności membran można zaliczyć: wzrost lepkości, zmniejszenie dyfuzyjności, efekt ciśnienia osmotycznego oraz opór tworzącego się placka filtracyjnego. Zanieczyszczone membrany charakteryzują się wyższym ciśnieniem operacyjnym (transmembranowym) oraz spadkiem ilości produkowanego permeatu, co generuje zwiększone zużycie energii elektrycznej, potrzebnej dla utrzymania wymaganej wydajności instalacji. Foulanty tworzą wówczas kolejną warstwę osadów, przez którą musi przejść nadawa, stąd wymagane jest wyższe ciśnienie. Trudny w zwalczaniu jest tzw. biofouling, który polega na wzroście i rozwoju mikroorganizmów w obrębie membran, powodując często nieodwracalne ich niszczenie. Fouling mikrobiologiczny jest skut-

kiem tworzenia się biofilmów na powierzchni membrany. Po immobilizacji mikroorganizmów na membranie rozpoczyna się ich wzrost i produkcja polimerowych substancji pozakomórkowych, które tworzą lepki, śluzowaty, uwodniony żel [1, 7, 9].

Technologia RO wymaga bardzo starannego wstępnego przygotowania wody przed właściwą instalacją membranową RO. Aby zapobiec blokowaniu się membran osmotycznych ciałami stałymi i osadem organicznym woda zasilająca powinna spełniać określone wymagania. Jednym z najszerzej stosowanych parametrów pozwalających na kompleksową ocenę jakości wody pod kątem zawartości foulantów jest współczynnik SDI, zwany indeksem koloidalnym. Zalecana wartość tego wskaźnika w wodzie zasilającej układy odsalania membranowego powinna kształtować się poniżej 3,0. Wskaźnik ten stosunkowo dobrze koreluje z mętnością wody, który to parametr jakościowy, przy zastosowaniu nefelometrycznej metody pomiaru, jest miernikiem liczby cząstek o rozmiarach poniżej 1 µm. Dla prawidłowo przygotowanej nadawy, jej mętność nie powinna być większa niż 0,1 NTU. Niespełnienie wymagań stawianych wodzie zasilającej prowadzi przede wszystkim do skrócenia czasu eksploatacji membran, wyższego zużycia wody, chemikaliów i energii elektrycznej. W celu utrzymania określonej wydajności procesów membranowych, oprócz zapewnienia wymaganej jakości nadawy, wymagane jest także stosowanie substancji zapobiegających foulingowi i biofoulingowi, a także okresowe czyszczenie membran, okresowa wymiana membran, sprawdzanie integralności membran [2, 3, 11].

Mętność wody oraz SDI nie są jedynymi wskaźnikami wystarczającymi do oceny podatności membran osmotycznych na fouling. Dla poprawnej, długotrwałej pracy tych elementów układów przygotowania wody uzupełniającej bardzo ważne jest monitorowanie poziomów zanieczyszczeń organicznych, zwłaszcza tych powodowanych przez naturalną materię organiczną (NOM). Nieusunięte związki humusowe z uwagi na swoje własności fizyczne – chemiczne mają tendencję do blokowania powierzchni membran i zmniejszenia efektywności ich działania. Objawia się to spadkiem skuteczności odsalania oraz wzrostem oporów hydraulicznych filtracji membranowej. Dlatego też, jednym z podstawowych warunków prawidłowego działania tego typu instalacji jest jak największe obniżenie zawartości tych zanieczyszczeń mierzone jako Ogólny Węgiel Organiczny. Niewystar-

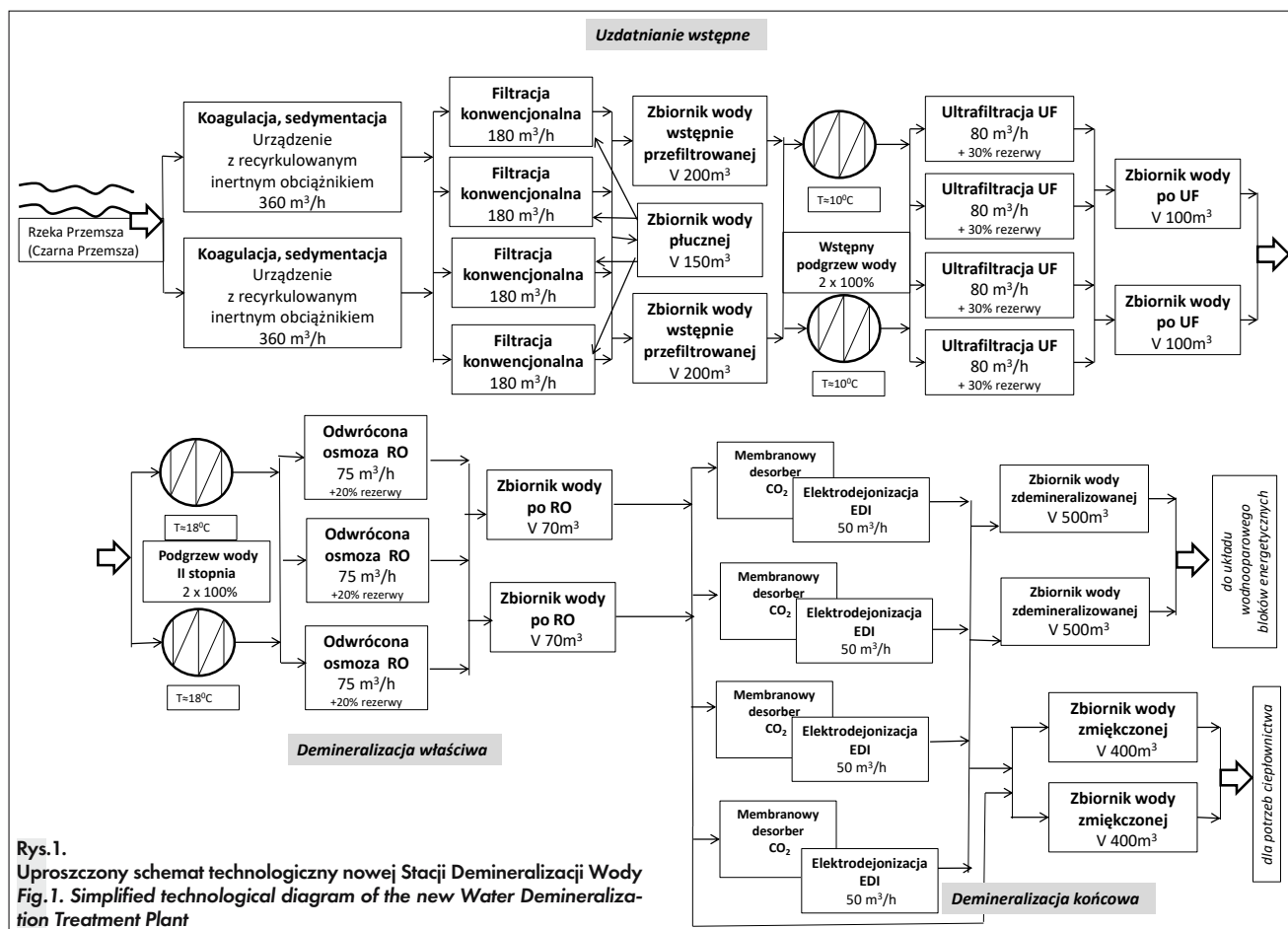
czające usuwanie materii organicznej skutkuje koniecznością zwiększenia częstotliwości procedur czyszczenia membran (CIP), a w konsekwencji obniżeniem ich żywotności i częstszej wymiany. Zwiększone stężenie OWO w wodzie zasilającej układy odwróconej osmozy przekłada się także na zwiększoną zawartość tego typu zanieczyszczeń w permeacie, co bardzo często uniemożliwia produkcję wody o parametrach wymaganych dla wody ultraczystej [4-6, 8, 10, 12-13].

Celem pracy jest przedstawienie wpływu rodzaju zanieczyszczeń organicznych, opisanych poprzez wskaźnik absorpcji właściwej w nadfiolecie (SUVA₂₅₄) na dobór i projektowanie systemów wstępnego uzdatniania wody zasilającej instalację membranową pracującą z wykorzystaniem membran do odwróconej osmozy.

Ogólny opis instalacji

W lipcu 2020 r. w TAURON Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Łagisza w Będzinie została przekazana do eksploatacji nowa Stacja Demineralizacji (SDW). Wykonawcą inwestycji było Konsorcjum Instal Kraków S.A. – Hidrofilt Water Treatment Ltd. Instalacja ta służy zarówno do produkcji wody zdemineralizowanej o parametrach fizykochemicznych odpowiadających tzw. wodzie ultraczystej, przeznaczonej do uzupełniania obiegu wodno-parowego bloku energetycznego o mocy 460 MW na parametry nadkrytyczne, jak i wody na uzupełnienie obiegu ciepłowniczego. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 1.

Instalacja zastąpiła jedną z pierwszych funkcjonujących w polskiej energetyce a pochodzącej z końca ubiegłego wieku stację demineralizacji, również opartą w większości na ciśnieniowych technikach membranowych, tj. mikrofiltracji i odwróconej osmozie. Konieczność budowy nowej instalacji wynikała ze znacznego stopnia zużycia technicznego istniejącego układu uzdatniania i zmiany źródła wody surowej. W chwili obecnej obok wtórnego wykorzystania zużytych wód w energetyce zawodowej stosuje się także inne sposoby oszczędzania zasobów wodnych, m.in. poprzez utrzymywanie wyższych współczynników zagęszczania wody krążącej w zamkniętych obiegach chłodzących w połączeniu z odpowiednim kondycjonowaniem wody za pomocą preparatów chemicznych. W przypadku wykorzystania strumieni odpadowych np. z układów chłodzenia do produkcji wód czystych, wyższe współczynniki zagęszczania oraz zastosowanie preparatów, zwłaszcza



dyspersatorów zawieszin, mogą przyczynić się do pogorszenia warunków pracy układów membranowych. Efekty tego obserwowane są w postaci nasilonego zjawiska foulingu membran, co z kolei niekorzystnie wpływa na żywotność modułów membranowych. O ile w dotychczasowej instalacji woda z podstawowego źródła, tj. z rzeki Przemszy, przed podaniem do instalacji membranowej ulegała ok. 3-krotnemu zagęszczeniu na skutek odparowania w zamkniętym układzie chłodzenia przeznaczonych do trwałego wyłączenia z eksploatacji bloków 120 MW, to w nowej instalacji zdecydowano się na zastosowanie do procesu demineralizacji wody pochodzącej bezpośrednio ze źródła, utrzymując odpowiednio wyższe zagęszczenie w obiegu chłodzącym funkcjonującego bloku 460 MW.

Analiza skuteczności wstępnego przygotowania wody dla nowej SDW w TAURON Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Łagisza w Będzinie

Przed modernizacją układu technologicznego proces wstępnego przygotowania wody przed jej demineralizacją był

częściowo realizowany na drodze przygotowania wody do obiegu chłodzącego elektrowni, tj. zmiękczenie metodą wapienną (dekarbonizacja) połączoną z koagulacją związków organicznych i sedymentacją, prowadzoną w akceleratorach. Tak przygotowana woda uzupełniająca, trafiała do obiegu chłodzącego, skąd po około trzykrotnym zagęszczeniu poddawana była koagulacji powierzchniowej (w złożu filtracyjnym) i równoczesnej filtracji na ciśnieniowych filtrach zwirowych. Proces uzdatniania wstępnego kończył się mikrofiltracją ciśnieniową na polipropylenowych membranach typu M10C o średnicy porów 0,2 µm.

W nowym układzie technologicznym wstępne przygotowanie wody jest oparte na następujących procesach jednostkowych: koagulacja objętościowa z sedymentacją wspomaganą, filtracja pospieszna oraz ultrafiltracja. Taka konfiguracja metod zapewnia usunięcie z wody substancji mogących uszkodzić lub zablokować membrany odwróconej osmozy, stosowane w procesie odsalania wody. W chwili obecnej woda powierzchniowa poddawana jest koagulacji z zastosowaniem wysokozasadowego koagulantu na bazie chlorowodorotlenku glinowego. Proces koagulacji i flokulacji prowadzony

jest w dwóch reaktorach zintegrowanych z osadnikami o wydajności 360 m³/h każdy. Procesy uzdatniania na tym etapie wspomaga zastosowanie inertnego obciążnika mineralnego (garnet), cyrkulującego w układzie zamkniętym, oraz pakietów sedymentacyjnych w części osadczą urządzenia. Uzdatnianie wstępne w końcowym etapie obejmuje proces ultrafiltracji ciśnieniowej na modułach Toray HFUG-2020AN, o nominalnej średnicy porów 0,01 µm. Wstępnie uzdatniona woda podawana jest na trzy dwustopniowe jednostki odwróconej osmozy, produkujące łącznie 225 m³/h permeatu.

W tabeli 1 przedstawiono skuteczność procesu wstępnego przygotowania wody przed jednostkami RO w całym okresie pracy układu, począwszy od rozruchu technologicznego tj. w okresie 36 miesięcy.

Jak wskazują wyniki zawarte w tabeli zastosowane procesy wstępnego uzdatniania pozwalają na uzyskanie jakości wody zgodnej z wymaganiami dostawcy membran RO. W instalacji tej uzyskuje się wodę pozbawioną zawieszin i substancji kolidalnych w stopniu umożliwiającym podanie jej na membrany odwróconej osmozy bez obawy o powlekanie membran, skutkiem którego byłoby zablokowanie przepływu (SDI≤3,0 mętność <1,0 NTU).

Tabela 1. Wartości podstawowych wskaźników jakościowych wody surowej i po wstępnym uzdatnieniu przed procesem RO

Table 1. Values of basic quality indicators of raw water and water after pre-treatment before the RO process

Miejsce poboru	Parametr (min ÷ maks.)				
	Żelazo ogólne [mg/dm ³]	Mangan ogólny [mg/dm ³]	Mętność [NTU]	OWO [mg C/dm ³]	SDI [-]
Woda surowa	0,20÷0,72	0,03÷0,17	1,2÷5,1	4,1÷9,2	nie badano
Woda po reaktorze wielokomorowym	0,10÷0,21	0,03÷0,15	0,4÷4,5	3,6÷5,2	nie badano
Woda po filtrach pospiesznych	0,005÷0,07	0,03÷0,08	0,2÷0,4	3,5÷5,1	nie badano
Woda po jednostkach UF	Poniżej 0,005	0,01 – 0,03	0,01 – 0,08	3,2÷5,0	< 3,0

W obu przypadkach proces realizowany jest w trybie filtracji jednokierunkowej, czyli strumień nadawy w całości przechodzi w strumień permeatu. W przypadku nowej instalacji istnieje możliwość przełączenia trybu pracy na system filtracji krzyżowej, jednak – według założeń – ma ona stanowić alternatywę na wypadek gwałtownego pogorszenia się parametrów uzdatnianej wody.

Z przedstawionych w tabeli 1 danych widać, że woda surowa zasilająca układ uzdatniania cechuje się znacznymi wahaniami zawartości naturalnej materii organicznej. W miesiącach zimowych, gdy nie mamy do czynienia z wodami roztopowymi, stężenia Ogólnego Węgla Organicznego są niskie i nie przekraczają 4,0 mg C/dm³. W pozostałych miesiącach ilość zanieczyszczeń organicznych znacząco rośnie, aż do poziomu ponad 9,0 mg C/dm³ w miesiącach letnich. Jednak to nie zmienna jakość ujmowanej wody surowej była najważniejszym czynnikiem wpływającym na efektywność działania układu wstępnego uzdatniania wody. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń organicznych była determinowana przez podatność wody na oczyszczanie metodą koagulacji. Jednym z parametrów pozwalającym na ocenę skuteczności jest tzw. specyficzna absorbanca w nadfiolecie przy długości fali 254 nm (Specific UV Absorbance – SUVA254). W tabeli 2 przedstawiono zależność pomiędzy wartością SUVA254 a spodziewaną efektywnością koagulacji.

Z przedstawionych danych wynika, że wody cechujące się specyficzną absor-

bancją poniżej wartości 3 m²/g C przy jednocześnie wysokiej zawartości NMO będą sprawiać problemy objawiające się zwiększonym foulingiem membran osmotycznych.

Rozszerzona analiza wody zasilającej modernizowaną instalację wykazała, że wartość SUVA254 dla niej kształtuje się w zakresie od 1,9 do 2,3 m²/g C. Oznacza to, że zastosowanie koagulacji wymagało odpowiedniego podejścia do implementacji procesu koagulacji już na etapie projektowania układu uzdatniania. Oprócz niskiej podatności zanieczyszczeń organicznych na koagulację należało wziąć pod uwagę także stosunkowo niską mętność wody. Była ona spowodowana wstępną sedymentacją zachodzącą w zbiorniku retencyjnym zlokalizowanym na ujęciu wody surowej. W efekcie tego powstające aglomeraty pokoagulacyjne cechują się niską gęstością, co utrudnia ich separację z wody, szczególnie w okresach niskich temperatur ujmowanej wody. Dla tego typu wód najlepsze efekty separacji lekkich zawiesin pokoagulacyjnych uzyskuje się przy zastosowaniu flotacji ciśnieniowej rozpuszczonym powietrzem lub sedymentacji wspomaganej obciążnikiem inertnym. Z uwagi na wymogi Inwestora w instalacji zastosowano drugi z powyższych procesów usuwania zawiesiny pokoagulacyjnej.

Dla uzyskania jakości wymaganej przez membrany do odwróconej osmozy przeprowadzono szereg testów i symulacji przedprojektowych mających na celu określenie wymaganych parametrów

technologicznych prowadzenia koagulacji. Uzyskane wyniki wykazały, że nie można zastosować typowych rozwiązań wykorzystywanych w układach koagulacji i sedymentacji wspomaganej, mających na celu minimalizację wielkości reaktorów wielokomorowych. Rozwiązania te bardzo dobrze sprawdzają się w przypadku oczyszczania wód o wysokiej mętności, ale nie pozwalają na prowadzenie koagulacji wg mechanizmów tzw. koagulacji zmiatającej, a jedynie zastosowanie tego typu procesu pozwalało na uzyskanie dostatecznie wysokiego stopnia usuwania zanieczyszczeń organicznych. Dlatego też komory szybkiego i wolnego mieszania zaprojektowano pod kątem możliwości prowadzenia w nich koagulacji w warunkach przesycenia układu dyspersyjnego produktami hydrolizy koagulantu. Zarówno geometrię komór, jak i sposób rozwiązania procesu mieszania zaprojektowano z uwzględnieniem konieczności zmian w szerokim zakresie parametrów hydraulicznych i procesowych [6, 12].

Jako koagulant wytypowano wstępnie zhydrolizowany reagent glinowy o wysokiej zasadowości. Cechuje się on dużymi zdolnościami neutralizacji zanieczyszczeń koloidalnych dzięki wysokiemu ładunkowi powierzchniowemu powstających agregatów koagulacyjnych oraz pożądanym rozkładem wielkości powstających cząstek. Właściwości te pozwalają na efektywne usuwanie związków humusowych, stanowiących podstawowy składnik naturalnej materii organicznej oraz umożliwiając powstawanie trwałych aglomeratów kłaczków – ziarno inerty, o wysokiej odporności na rozpad.

Zastosowane rozwiązania pozwoliły na osiągnięcie efektu oczyszczania wyższego, od spodziewanego w oparciu o dane teoretyczne. Jak widać z danych przedstawionych w tabeli stopień usuwania zanieczyszczeń organicznych mierzonych jako OWO kształtuje się w zakresie od 15% do 45%. Praktycznie cały ładunek zanieczyszczeń usuwany jest już na etapie koagulacji prowadzonej w reaktorach wielokomorowych. Filtry pospieszne służą jedynie do usuwania zawiesiny resztkowej. Pozwala to na stworzenie bardzo dobrych warunków dla pracy membran ultrafiltracyjnych, których zadaniem jest obniżenie współczynnika SDI poniżej 3,0.

Oprócz bardzo wysokiej skuteczności usuwania zanieczyszczeń organicznych notuje się także dużą efektywność działania układu w zakresie usuwania związków żelaza i manganu, które traktowane są przez producentów membran jako typowe foulanty, czyli substancje powodujące

Tabela 2. Zastosowanie absorbancji właściwej w nadfiolecie – SUVA254, jako wskaźnika jakościowego opisującego właściwości substancji organicznych i zalecane metody ich usuwania [6, 10]

Table 2. Application of specific ultraviolet absorbance – SUVA254, as a qualitative indicator describing the properties of organic substances and recommended methods of their removal [6, 10]

SUVA254 [m ² /g C]	Właściwości substancji organicznych	Metoda oczyszczania wody
większa niż 4	Wysoka zawartość hydrofobowych oraz aromatycznych i wielkocząsteczkowych frakcji RWO	Koagulacja (skuteczność do 80%)
poniżej 3	Przewaga substancji niehumusowych, hydrofilowych oraz o małych ciężarach cząsteczkowych	Koagulacja (skuteczność do 30%), zalecane metody sorpcyjne
poniżej 2	-	W wypadku wody surowej brak wskazań do stosowania koagulacji. W wypadku wody oczyszczonej brak wskazań do dalszego usuwania RWO

zjawisko foulingu. Żelazo ogólne usuwane było w trakcie koagulacji i filtracji pospiesznej do poziomu poniżej 0,1 mg Fe/dm³, czyli wartości zalecanej dla membran osmotycznych. Podobnie, jak żelazo ogólne, również stężenie manganu uległo znacznemu obniżeniu. Jednak w jego przypadku mechanizm usuwania opierał się na utlenianiu na samoistnie aktywowanych złożach filtrów pospiesznych. W filtracji po jednostkach UF jego stężenie nie przekraczało 0,05 mg/dm³.

Podsumowanie

Układ wstępnego przygotowania wody jest bardzo istotnym elementem dla prawidłowej pracy instalacji odwróconej osmozy. Niespełnienie wymagań jakości wody zasilającej instalację RO prowadzi przede wszystkim do skrócenia czasu eksploatacji membran, wyższego zużycia wody, chemikaliów i energii elektrycznej. Jakość wody uzyskiwana w analizowanym układzie wstępnego przygotowania wody potwierdza wysoką skuteczność tego etapu uzdatniania, gwarantując prawidłową eksploatację modułów membranowych RO.

Woda surowa zasilająca stację wstępnego przygotowania wody cechuje się znacznym, zmiennym stężeniem zanieczyszczeń organicznych oraz niską podatnością na ich usuwanie w procesie koagulacji mierzzonej jako SUVA₂₅₄. Zastosowanie procesu koagulacji zmiatającej umożliwiło uzyskanie jakości wody po membra-

nach ultrafiltracyjnych pozwalających, bez względu na jakość wody surowej, bezpiecznie zasilać membrany osmotyczne i uzyskiwać bardzo dobre efekty ich pracy. Stężenie OWO w wodzie po dwustopniowej odwróconej osmozie nigdy nie przekracza 0,3 mg C/dm³, a 95% wartości jest niższe od 0,1 mg C/dm³, czyli na poziomie wymaganym dopiero po demineralizacji końcowej pracującej w oparciu o proces elektrodjonizacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Juboori, R.A., and Yusaf, T.; Biofouling in RO system: mechanisms, monitoring and controlling; *Desalination*; 2012; Vol. 302; pp. 1-23; DOI: 10.1016/j.desal.2012.06.016.
- [2] Anis S.F., Hashaikh R., Hilal N.; Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review; *Desalination*; 2019; Vol. 452; pp. 159-195; DOI: 10.1016/j.desal.2018.11.006.
- [3] Arkhangelsky E., Wicaksana F., Tang C., Al-Rabiah A., Al-Zahrani S., Wang R.; Combined organic-inorganic fouling of forward osmosis hollow fiber membranes; *Water Research*; 2012; Vol. 46; Issue 19; pp. 6329-6338; DOI: 10.1016/j.watres.2012.09.003.
- [4] Chen G., et.al; Performance of different pretreatment methods on alleviating reverse osmosis membrane fouling caused by soluble microbial products; *Journal of Membrane Science*; 2022; Vol. 641; 119850; DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119850.
- [5] Cornelissen E., Harmsen D., Blankert B., Wessels L., van der Meer W.; Effect of minimal pre-treatment on reverse osmosis using surface water as a source; *Desalination*; 2021; Vol. 509; 115056; DOI: 10.1016/j.desal.2021.115056.
- [6] Edzwald J.K., Tobiasson J.E.; Enhanced coagulation: US requirements and a broader view.

- Water Science and Technology*; 1999; Vol. 40; No. 9; pp. 63-70; DOI:10.1016/S0273-1223(99)00641-1.
- [7] Frunzo L., Luongo V., Maria Rosaria Mattei, Alberto Tenore; Qualitative analysis and simulations of the biological fouling problem on filtration membranes; *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*; Volume 8, December 2023; 100557; DOI: 10.1016/j.padiff.2023.100557.
- [8] Klos M., Gumińska J.; Zastosowanie licznika cząstek do oceny efektywności koagulacji powierzchniowej; *Instal*; 2016, nr 7/8, ss. 52-56.
- [9] Mahlangu O.T., Nthunya L.N., Motsa M.M., Morifi E., Richards H., Mamba B.B.; Fouling of high pressure-driven NF and RO membranes in desalination processes: Mechanisms and implications on salt rejection, *Chemical Engineering Research and Design*; 2023; Vol. 199; pp. 268-295, DOI: 10.1016/j.cherd.2023.09.037.
- [10] Molczan M., Szlachta M., Karpińska A., Biłyk A.; Zastosowanie absorbancji właściwej w nadfiolecie (SUVA) w ocenie jakości wody; *Ochrona Środowiska*; 2006; ss. 11-16.
- [11] Nthunya L., Lebea N., Bopape M.F., Mahlangu O.T., Mamba B.B., Van der Bruggen B., Quist-Jensen C.A.; Richards H.; Fouling, performance and cost analysis of membrane-based water desalination technologies: A critical review; *Journal of Environmental Management*; 2022; Vol. 301; 113922; DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113922.
- [12] White M.C., Thompson J.D., Harrington G.W., Singer P.C.; Evaluating criteria for enhanced coagulation compliance; *Journal AWWA*; 1997; Vol. 89; No. 5; pp. 64-77; DOI: 10.1002/j.1551-8833.1997.tb08228.x.
- [13] Zhang J., Northcott K., Duke M., Scales P., Gray S.; Influence of pre-treatment combinations on RO membrane fouling; *Desalination*; 2016; Vol. 393; pp. 120-126; DOI: 10.1016/j.desal.2016.02.020.