

FILTRACJA CZY SEPARACJA – ANALIZA PORÓWNAWCZA KOSZTÓW DLA SYSTEMÓW UZDATNIANIA WODY PODZIEMNEJ

Małgorzata Makowska, Jan Krauze

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Do zaopatrzenia ludności w wodę na potrzeby bytowo- gospodarcze korzysta się z wód powierzchniowych lub podziemnych. Małe stacje wodociągowe eksploatują wodę najczęściej z ujęć głębinowych, z podwyższoną zawartością przede wszystkim żelaza i manganu. Wodę o takich parametrach można uzdatnić metodami klasycznymi opartymi na filtracji przez złożo żwirowe lub metodami nowoczesnymi, np. poprzez separację membranową (mikrofiltracja, nanofiltracja, ultrafiltracja, odwrócona osmoza). Każda technologia generuje określone koszty, dlatego też przeprowadzono analizę porównawczą kosztów technologii klasycznej i membranowej dla modernizowanej stacji uzdatniania wody o średniej wydajności $571 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Obliczono całkowite koszty inwestycyjne i koszty technologii dla dobranych urządzeń (przy założeniu okresu eksploatacji 30 lat) i stwierdzono, że są one porównywalne dla obu technologii. Różnica wynosi odpowiednio 3,0% i 7,5% na korzyść technologii klasycznej. W przypadku budowy nowej stacji technologię klasyczną przedraża jednak koszt budynku. Przewiduje się, że wraz ze wzrostem popularności technologii membranowych koszty ich zastosowania będą stopniowo malały.

Słowa kluczowe: uzdatnianie wody, filtracja, separacja membranowa, ultrafiltracja, analiza kosztów

WSTĘP

Zasoby wody są obecnie na świecie eksploatowane znacznie intensywniej, niż jeszcze 50 lat temu, kiedy uważano, że są one niewyczerpane. Niezbędna do życia woda słodka stanowi jedynie 2,5%, co daje około 35 mln km³ [Poskrobko i in. 2007]. Według danych KZGW [2010] ilość zmagazynowanych w Polsce wód podziemnych wynosi 6 mld m³.

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab. inż. Małgorzata Makowska, mgr inż. Jan Krauze, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94 A, 60-649 Poznań, e-mail: mmak@up.poznan.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

Są to głównie wody pochodzące z utworów czwartorzędowych. Na potrzeby gospodarki i ludności korzysta się przede wszystkim z wód powierzchniowych (około 84%); na potrzeby ludności zużywane jest około 19% wody [GUS 2015]. Wymagania dla wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi określa prawo unijne poprzez Dyrektywę Rady Europy z 3 listopada 1998 r. [Dyrektywa... 1998] oraz Dyrektywę Komisji UE z 6 października 2015 r. [Dyrektywa... 2015]. W prawie polskim jakość wody do picia jest określona w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z 13 listopada 2015 r. [Rozporządzenie... 2015].

Małe stacje uzdatniania wody korzystają zwykle z ujęć głębinowych [Nowobilaska-Luberda i in. 2013], w których woda charakteryzuje się przekroczoną zawartością żelaza i manganu. Podstawowa metoda uzdatniania takiej wody polega na jej napowietrzeniu i przefiltrowaniu przez filtry ciśnieniowe ze złożem żwirowym. Rozpuszczone w wodzie sole żelaza i manganu ulegają hydrolizie, po czym są utleniane do nierozpuszczalnych wodorotlenków ulegających flokulacji i tworzących zawiesinę, która jest oddzielana od wody w procesie filtracji. W trakcie aeracji usuwany jest również wolny dwutlenek węgla oraz azot amonowy (głównie jon amonowy i amoniak), jednak skuteczne utlenienie manganu do formy nierozpuszczalnej wymaga dodatkowych zabiegów w postaci impregnacji złoża braunsztyнем lub podwyższenia pH.

W związku z coraz większymi wymaganiami stawianymi wodzie do picia oraz wzrastającym zanieczyszczeniem zasobów wody, poszukiwane są technologie bardziej efektywne. Jak uważają Nawrocki [2010] oraz Bodzek i Konieczny [2011], uzupełnić lub wręcz zastąpić klasyczne metody uzdatniania mogą techniki separacji membranowej, zapewniające stałą jakość wody uzdatnionej przy zastosowaniu modułowych, w pełni zautomatyzowanych systemów, zajmujących mniej miejsca, niż klasyczne zestawy filtracyjne.

Celem pracy jest weryfikacja hipotezy mówiącej, że techniki membranowe mogą być stosowane zamiennie z technikami klasycznej filtracji na złożach tak ze względu na aspekt technologiczny jak i ekonomiczny. Zakres pracy obejmuje porównanie efektu ekonomicznego inwestycji w obu wariantach technologicznych dla wybranego obiektu poddawanego modernizacji.

CHARAKTERYSTYKA METOD MEMBRANOWYCH

Membrana filtracyjna jest przegrodą, przez którą przenika co najmniej jeden ze składników oczyszczanego roztworu (tzw. nadawy), co zapewnia odpowiednią jakość filtratu. Spełnia ona rolę selektywnej bariery w procesie transportu masy [Koros i in. 1996, Mulder 1991]. Urządzenia do separacji membranowej mają postać modułów (spiralnych, kapilarnych, rurowych, płytowo-ramowych) o różnej wydajności, dobieranych w zależności od zastosowania w przemyśle, medycynie, biotechnologii, uzdatnianiu i odnowie wody.

W celu uzdatniania wody do picia stosuje się trzy grupy technik separacji membranowej: najczęściej stosowane techniki ciśnieniowe (mikrofiltracja MF, ultrafiltracja UF, nanofiltracja NF i odwrócona osmoza RO), techniki dyfuzyjne (destylacja membranowa MD) i techniki prądowe (elektrodializa ED i elektrodializa odwracalna EDR). W uzdat-

nianiu wody najczęściej stosuje się techniki ciśnieniowe: mikrofiltrację (zazwyczaj jako filtrację wstępną), umożliwiającą usuwanie z wykorzystaniem mechanizmu sitowego zawieszin, substancji rozpuszczonych i bakterii przy ciśnieniu do 0,3 MPa, ultrafiltrację, umożliwiającą usuwanie zawieszin, substancji wielkocząsteczkowych, koloidów, bakterii i wirusów przy ciśnieniu od 0,1 do 1,0 MPa (również mechanizm sitowy), nanofiltrację, pozwalającą poprzez mechanizm dyfuzyjny usunąć jony wielowartościowe i związki organiczne przy ciśnieniu od 0,5 do 3,0 MPa oraz odwróconą osmozę umożliwiającą usuwanie substancji małocząsteczkowych przy ciśnieniu od 1,0 do 10,0 MPa (również mechanizm dyfuzyjny).

Zastosowanie ultrafiltracji (UF) do uzdatniania wód powierzchniowych i podziemnych proponują Farcy i Doucoure [2010], dając jako przykład stację uzdatniania wody z Sekwany. Gao i in. [2011] podają, że mętność wody po ultrafiltracji może wynosić nie więcej niż 0,4 NTU. Do zmiękczenia wody stosuje się nanofiltrację (NF) [Thorsen i Fløgstad 2006].

W trakcie filtracji na powierzchni membrany mogą zachodzić zjawiska blokujące przepływ, takie jak fouling, czyli odkładanie na powierzchni substancji zawartych w nadawie lub scaling, to znaczy wytrącanie na powierzchni związków trudno rozpuszczalnych lub krystalizujących. Zjawiska te minimalizuje się poprzez płukanie wodą, wodą z dodatkiem chemikaliów lub samymi chemikaliami oraz przez odpowiednie przygotowanie nadawy (koagulacja, węgiel aktywny, prefiltracja, dezynfekcja).

Ponieważ żywotność stacji uzdatniania wody jest zwykle przewidziana na 30 lat, urządzenia muszą być odpowiednio zaprojektowane. W procesie projektowania bierze się pod uwagę odpowiedni dobór procesu i membrany, przestrzeń zajmowaną przez system oczyszczający, minimalizację strat ciśnienia i zjawisk niekorzystnych jak fouling czy scaling, a przede wszystkim minimalizację kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

METODYKA BADAŃ

Analizę porównawczą dwóch technologii uzdatniania wody oparto na obliczeniach parametrów pracy i doborze urządzeń, zgodnie z przyjętymi schematami technologicznymi dla wersji z klasycznymi filrami i dla wersji z separacją membranową. Zestaw klasyczny obliczono zgodnie z metodyką standardową [Kowal i Świdorska-Bróz 2003]; wyznaczono powierzchnie filtracji przy prędkości filtracji $10 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, ilość wody popłucznej, dobrano filtry, aerator, dmuchawę, zestaw hydroforowy, pompy i chlorator. Dobór membran przeprowadzono na podstawie jakości wody surowej za pomocą programu INGE Design System. Część elementów systemu uzdatniania jest taka, jak w wariancie klasycznym, gdyż nie mają one wpływu na pracę zestawu do separacji membranowej. Dodatkowo dobrano tzw. techniki pomocnicze, służące do wspomaganie pracy i czyszczenia membran.

Analiza ekonomiczna obejmuje koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Kosztorys inwestycji wykonano przy pomocy programu Norma Expert. Roczny koszt eksploatacji obliczono zgodnie z równaniem (1):

$$K_e = I \cdot a + K_r + K_w + K_{ch} + K_s, \text{ zł} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- I – koszt inwestycji, zł,
- a – współczynnik odzysku kapitału, przyjęto 8%,
- K_r – koszt energii elektrycznej, zł · rok⁻¹,
- K_w – koszt wymiany elementów filtracyjnych, zł · rok⁻¹,
- K_{ch} – koszt chemikaliów, zł · rok⁻¹,
- K_s – koszt serwisu, zł · rok⁻¹.

Koszt energii obliczono biorąc pod uwagę zużycie przez poszczególne urządzenia i cenę jednostkową (2) oraz przeliczono na 1 m³ produkowanej wody:

$$K_r = C_e \cdot \sum_{i=1}^n E_{r_i}, \text{ zł} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

- C_e – cena jednostkowa energii elektrycznej, zł · kWh⁻¹, przyjęto 0,53,
- n – liczba urządzeń,
- E_r – zużycie energii przez urządzenie, kWh · rok⁻¹:

$$E_r = P_r \cdot t_r = P_r \cdot \frac{Q_{r\dot{s}r}}{Q_u}, \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (3)$$

- P_r – moc urządzenia, kW,
- t_r – roczny czas pracy, h · rok⁻¹,
- $Q_{r\dot{s}r}$ – średnia roczna wydajność stacji wodociągowej, m³ · rok⁻¹,
- Q_u – wydajność urządzenia, m³ · h⁻¹.

Koszt wymiany materiału lub elementu filtracyjnego i chemikaliów obliczono z równań (4) i (5):

$$K_w = \frac{1}{t_w} \cdot C_f, \text{ zł} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (4)$$

$$K_{ch} = Q_{r\dot{s}r} \cdot D_{ch} \cdot C_{ch}, \text{ zł} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (5)$$

gdzie:

- t_w – częstotliwość wymiany, rok,
- C_f – koszt materiału/elementu filtracyjnego, zł,
- D_{ch} – dawka chemikaliów, g · m⁻³,
- C_{ch} – cena jednostkowa chemikaliów, zł · rok⁻¹.

Ponieważ obie rozważane technologie są w pełni zautomatyzowane, przyjęto takie same nakłady do obliczenia rocznych kosztów serwisu (6):

$$K_s = \frac{n_d}{N} \cdot m \cdot C_s + C_r, \text{ zł} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (6)$$

gdzie:

- n_d – liczba osobodni na miesiąc, przyjęto 2 na sprzątnięcie i uzupełnienie chemikaliów i 2 na pobór próbek do badań,

- N – liczba dni roboczych w miesiącu, przyjęto 22,
 m – liczba miesięcy w roku, przyjęto 12,
 C_s – wynagrodzenie, przyjęto 2000 zł,
 C_r – koszt corocznego płatnego serwisu, przyjęto 2000 zł.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I DOBÓR ALTERNATYWNYCH SYSTEMÓW UZDATNIANIA WODY

Analizowana stacja uzdatniania wody jest położona na terenie niezurbanizowanym. Dostarcza wodę do małej miejscowości, a awaryjnie może być źródłem zaopatrzenia w wodę dla całej gminy. Stacja została zaprojektowana w latach 80. ubiegłego wieku na wydajność $Q_{d.sr} = 571 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ($Q_{h.max} = 40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Woda głębinowa jest pobierana ze studni głębinowej o wydajności $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Skład wody surowej podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki analizy wody surowej ze studni głębinowej
Table 1. The results of the analysis of raw water from deep wells

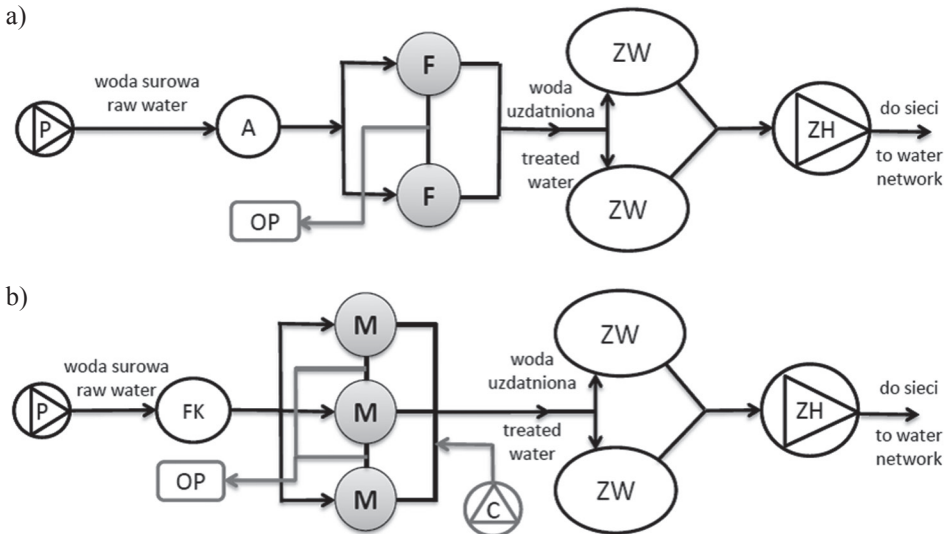
Wskaźnik jakości wody Indicator of water quality	Wartość Value	Jednostka Unit	Wartość dopuszczalna Limit value
Barwa – Color	10	mgPt/l	15
Mętność – Turbidity	9,1	NTU*	1
Odczyn – pH	7,5	pH	6,5–9,5
Amonowy jon – Ammonium	< 0,10	mgNH4+/l	0,50
Azotany – Nitrates	3,9	mgNO3-/l	50
Azotyny – Nitrites	< 0,005	mgNO2-/l	0,50
Mangan – Manganese	0,046	mgMn/l	0,050
Żelazo – Iron	0,576	mgFe/l	0,200
Bakterie grupy coli w 100 ml Coli bacteria in 100 ml	0	jtk / cfu*	0
Escherichia coli w 100 ml	0	jtk / cfu	0
Enterokoki w 100 ml Enterococci in 100 mi	0	jtk / cfu	0

*jtk – jednostka tworząca kolonię
cfu – colony-forming unit

Jak wynika z powyższych danych, w wodzie przekroczona jest dopuszczalna wartość wskaźnika mętności i poziomu żelaza, a zawartość manganu jest bliska górnej granicy; nie stwierdzono natomiast zanieczyszczenia bakteriologicznego. System uzdatniania był oparty na technologii klasycznej. Ze względu na jego znaczne wyeksploatowanie, zdecydowano o modernizacji SUW. Modernizację przeprowadzono w oparciu o technologię klasyczną, jednak autorzy pracy, ze względu na możliwość zastosowania w tego rodzaju obiektach technologii separacji membranowej, przeprowadzili alternatywny dobór takiej technologii.

Technologia klasyczna

Technologia ta jest oparta na zwirowych filtrach pospiesznych; przyjęto układ dwustopniowego pompowania. Woda pobierana ze studni głębinowej jest napowietrzana w systemie zamkniętym, filtrowana na wielowarstwowych filtrach pospiesznych, następnie chlorowana i tłoczona do zbiorników wyrównawczych, skąd zestawem pompowym II^o podawana jest do sieci wodociągowej (ryc. 1a).



Ryc. 1. Schemat analizowanej SUW; a – system klasyczny, b – system membranowy P – pompa głębinowa, A – aerator, F – zestaw filtracyjny, M – zestaw membranowy, FK – filtr kartridżowy, ZW – zbiornik wyrównawczy, ZH – zestaw hydroforowy, C – chemikalia

Fig. 1. Scheme of analyzed water treatment plant; P – submersible pump, A – aerator, F – filter system, M – membrane system, FK – filter cartridge, ZW – compensatory tank, ZH – pressure tank, C – chemicals

Pompowanie wody ze studni odbywa się za pomocą pompy głębinowej GC.3.03.N (Hydro-Vacuum) o wydajności $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, przy ciśnieniu 48 m H₂O; moc pompy 7,5 kW. Napowietrzanie wody jest przeprowadzane w aeratorze ciśnieniowym o pojemności 1,7 m³, wypełnionym do połowy pierścieniami Raschiga o powierzchni czynnej 185 m² · m⁻³ (zestaw AIC 1000). Dla zalecanej ilości powietrza równej 10% wydajności stacji, przewidziano sprężarkę o wydajności 11,16 m³ · h⁻¹. Filtracja wody jest realizowana na dwóch równoległych zestawach filtracyjnych (FIC/106/6156) o powierzchni filtrów 2 m² każdy i granulacji złoża od 1,4–16 mm, wykonanych z pełnym oprzyrządowaniem. Płukanie powietrzno – wodne przewidziano za pomocą dmuchawy o wydajności 183 m³ · h⁻¹ i pompy płucznej o wydajności 87 m³ · h⁻¹, zamontowanej na ramie zestawu hydroforowego. Zastosowano odстойnik wód popłucznych o pojemności 15 m³. Na drugim stopniu pompowania zastosowano dwa zbiorniki wyrównawcze o pojemności 100 m³ każdy oraz zestaw hydroforowy II^o (Grundfos) o wydajności 70 m³ · h⁻¹, pracujący przy ciśnieniu 16 m H₂O. W celu dezynfekcji wody zastosowano zestaw

na podchloryn sodu DDC 6–10 (Grundfos) z pompą membranową, sterowaną wodomierzem. Cała stacja uzdatniania pracuje automatycznie, zarządzana przez sterownik mikroprocesorowy ICSW.

Technologia membranowa

Zastosowanie technologii separacji membranowej wymaga doboru zestawu filtracyjnego na podstawie dogłębnej analizy składu wody i czynników wpływających na proces. W omawianym układzie zaproponowano system ultrafiltracji (INGE GmbH), który może zastąpić klasyczne zestawy filtracyjne (ryc. 1b). Wybrano membrany kapilarne ϕ 1,5 mm, o wielkości porów 0,02 μm , wykonane z polieterosulfonu odpornego na czynniki chemiczne i mechaniczne. Za pomocą programu producenta, na przepływ dobowy maksymalny i dla zadanych parametrów wody surowej, dobrano zestaw 9 modułów o łącznej powierzchni 450 m^2 i wydajności netto 72,4 $\text{dm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Jako techniki pomocnicze zastosowano filtrację wstępną za pomocą filtra kartridżowego zatrzymującego cząstki większe niż 50 μm , utleniacz w postaci nadmanganianu potasu w ilości 125 $\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}$ oraz podchloryn sodu do dezynfekcji końcowej, w ilości 10 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Do przemywania i czyszczenia membran przewidziano ług sodowy (3,4 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$), kwas solny (1,8 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$) i kwas cytrynowy (17,8 $\text{kg} \cdot \text{mies.}^{-1}$). Zestaw uzupełniają pompa płuczna o wydajności 103,5 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ i sprężarka o wydajności 6 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ze względu na filtr wstępny konieczne było zastosowanie pompy głębinowej o większej wysokości podnoszenia niż w technologii klasycznej (SP46-5, Grundfos), ale o takiej samej mocy. Zestaw hydroforowy II⁰ wraz ze zbiornikiem wyrównawczym nie ma wpływu na proces separacji, więc pozostawiono go takim, jak w wariantcie klasycznym.

ANALIZA KOSZTÓW

Dla obu przedstawionych wariantów technologii uzdatniania wody wyliczono koszty budowy systemu (tab. 2).

Stwierdzono, że technologia membranowa jest na etapie inwestycji droższa od technologii klasycznej ze względu na koszt modułów membranowych, stanowiących 23,4% kosztów części technologicznej, przy 13,2% dla rozwiązania klasycznego (ryc. 2). koszt technologii okazał się wyższy o ok. 7,5%, a całkowity koszt inwestycji jedynie o 3%.

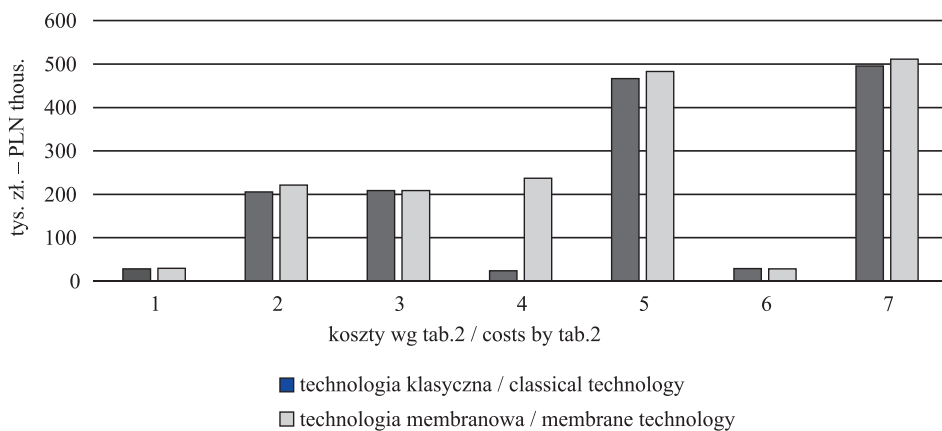
Trzeba jednak zauważyć, że w rozpatrywanym przypadku z wody nie trzeba usuwać manganu, co wydatnie zmniejszyło koszty inwestycyjne wariantu klasycznego. Istotne jest również, że analizowana stacja była poddana jedynie modernizacji. Dla nowej SUW w technologii klasycznej potrzebny jest nowy budynek, którego koszt jest znacznie wyższy od kosztu kontenera mogącego pomieścić cały układ technologiczny w wersji z separacją membranową.

W tabeli 3 zestawiono koszt całkowity inwestycji i eksploatacji dla obu wariantów, wyliczony zgodnie z równaniami 1–6.

Na ryc. 3 porównano podsumowane koszty. Okazało się, że eksploatacja technologii membranowej wypada taniej w zakresie zużycia wody do płukania i zużycia energii do produkcji wody, natomiast drożej w zakresie wymiany materiału filtracyjnego i zużycia środków chemicznych, co generuje o ok. 19% większą sumę całkowitych kosztów rocznych.

Tabela 2. Podsumowanie kosztorysu dla SUW z technologią klasyczną i membranową zł
 Table .2. Summary cost estimate for SUW classical and membrane technology, PLN

L.p.	Nazwa Name	Technologia klasyczna Classical technology	Technologia membranowa Membrane technology
1	Obudowa i wyposażenie studni głębiny Casing and equipment of deep well	28 417,47	29 684,95
2	Technologia w budynku Technology in the building	205 881,33	221 115,22
3	Zbiorniki wyrównawcze Water supply tanks	208 717,00	208 511,91
4	Zbiornik popłuczyn Filter washings tank	23 697,65	23 695,39
5	Koszty bezpośrednie Direct costs	466 713,45	483 007,47
6	Koszty pośrednie, Kp, 62% Indirect costs	28 986,72	28 424,54
	RAZEM – SUMMARY	495 700,17	511 432,01
	W tym – which consists:		
7	– robocizna – labor	62 002,56	6 066,97
	– materiały – material	419 960,01	437 160,75
	– sprzęt – equipment	13 737,60	13 604,29

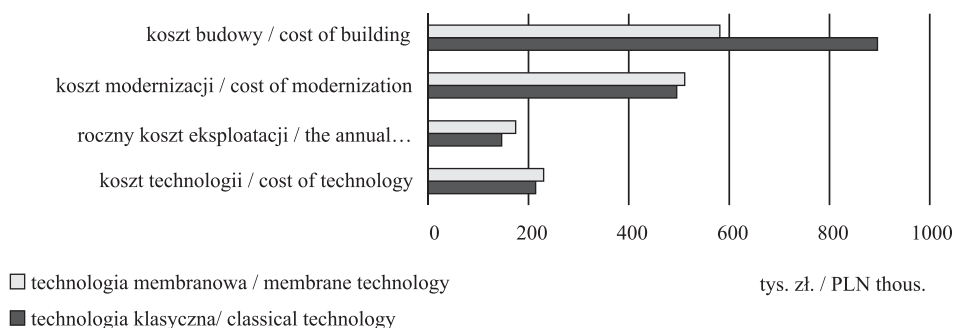


Ryc. 2. Porównanie kosztów modernizacji SUW

Fig. 2. Comparison of modernization costs for water supply station

Tabela. 3. Porównanie kosztów technologii membranowej i klasycznej
 Table 3. Cost comparison of classic and membrane technology

Nazwa Name	Jednostka Unit	Technologia klasyczna Classic technology	Technologia membranowa Membrane technology
Zużycie wody do płukania – Use of rinsing water	m ³ · h ⁻¹	1437	245
Zużycie energii do produkcji wody Energy consumption for water production	kWh · m ⁻³	0,343	0,339
Koszt energii elektrycznej do produkcji wody Electricity cost for water production	zł · m ⁻³	0,182	0,180
Całkowite roczne zużycie energii elektrycznej Total annual electricity consumption	kWh · rok ⁻¹	71 469,8	70 581,0
Całkowity koszt energii elektryczne Total electricity cost	zł · rok ⁻¹	37 887,76	37 407,93
Średni roczny koszt wymiany złóż–membrany Average annual cost of replacement of filter beds – membranes	zł · rok ⁻¹	195,43	6099,43
Roczny koszt środków chemicznych – Annual cost of chemicals	zł · rok ⁻¹	62 524,50	83 708,05
Całkowity roczny koszt – Total annual cost	zł · rok ⁻¹	146 618,57	174 493,61
Koszt technologii – Technology cost	zł	214 051,57	229 918,10
Koszt budynku/kontenera – Building / container cost	zł	400 000,00	70 000,00
Koszt modernizacji – Modernization cost	zł	495 700,17	511 432,01
Łączny koszt z nowym budynkiem/kontenerem – Total cost with new building/container	zł	895 700,17	581 432,01



Ryc. 3. Porównanie kosztów całkowitych dla analizowanych technologii
 Fig. 3. Comparison of total cost for the analyzed technologies

Trzeba jednak pamiętać, że stosunkowo niski koszt wymiany złóż klasycznych wynika z tego, że w rozważanym przypadku z wody nie jest usuwany mangan; koszt wymiany złoża kwarcowego do usuwania żelaza jest kilkukrotnie niższy, niż złoża katalitycznego do usuwania manganu.

Nie wszystkie składniki kosztów eksploatacyjnych można precyzyjnie określić na etapie projektowania. Są to m.in. koszty stosowania chemikaliów, gdyż ich dawki można ustalić dopiero w trakcie badań na zestawie pilotażowym. Badania pilotażowe mają również na celu takie ustalenie parametrów pracy systemu, aby zminimalizować zużycie energii i środków pomocniczych.

Budowa nowej stacji diametralnie zmienia koszty inwestycyjne, zwłaszcza systemu w wersji klasycznej. Warto zauważyć, że jednostkowy koszt instalacji do separacji membranowej maleje wraz z wydajnością stacji. Zgodnie z tym, co podaje Bodzek (2005), koszt technologii przy budowie stacji o wydajności powyżej $20\,000\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ spada ponad dwukrotnie w porównaniu ze stacją o wydajności kilkuset $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Podobnie kształtują się różnice między kosztami eksploatacji.

PODSUMOWANIE

Do uzdatniania wody przeznaczonej do celów bytowo-gospodarczych można stosować zarówno technologię klasyczną opartą na filtracji przez złoża zwirowe, jak i nowoczesną technologię separacji membranowej. W przypadku zastosowania ultrafiltracji, oprócz usuwania zanieczyszczeń takich jak żelazo i mangan, na membranie zatrzymywane są również koloidy i bakterie. Stosowanie technik membranowych może być w niektórych przypadkach nieefektywne lub nieuzasadnione ekonomicznie, na przykład ze względu na skład wody (osady, węglan wapnia), konieczność dodatkowego wstępnego oczyszczania oraz czyszczenia chemicznego membran. Techniki te mają jednak wiele zalet, takich jak stosunkowo mała zajmowana kubatura, możliwość pracy ciągłej i łatwa do wykonania rozbudowa systemu poprzez dodanie modułów. Sprawna, automatyczna eksploatacja, zapewnia lepszą jakość wody surowej niż techniki klasyczne.

W przypadku modernizacji stacji uzdatniania, koszty obu wariantów są porównywalne. Nowo budowany obiekt wypada korzystniej w wariantcie membranowym, zwłaszcza przy dużych wydajnościach. Mankamentem jest wymagany czas badań na zestawie pilotażowym, co nie występuje w układzie klasycznym i może być problemem przy konieczności szybkiej naprawy czy modernizacji. Wraz ze wzrostem popularności tego typu rozwiązań wzrosło doświadczenie projektantów i operatorów, co powinno skrócić ten etap powstawania stacji. Sukcesywnie będą też malały koszty instalacji, co ma miejsce na świecie od ok. 20 lat. W najbliższej przyszłości technologie membranowe mogą być alternatywą dla rozwiązań klasycznych.

LITERATURA

- Bodzek, M., Konieczny, K. (2005). Usuwanie zanieczyszczeń nieorganicznych ze środowiska wodnego metodami membranowymi. Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- Dyrektywa Rady Europy z 3 listopada 1998 (98/83/WE) w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
- Dyrektywa UE z 6 października 2015 (1787) zmieniająca załączniki II i III do Dyrektywy 98/83/WE
- Farcy, M., Doucoure, A. (2010). Membrane Systems for the Fight against Water-Borne Contaminants in Small Communities and Remote Areas from the Developing World: Accomplishments in Thailand and Some New Development in Senegal and Mali. *The Open Biology Journal*, 3(2010), 74–80.
- Gao, W., Liang, H., Wang, L., Chang, H., Li, G. (2011). Pilot Study of Integrated MF-based MBR and UF for Drinking Water Production by Treating Micropolluted Source Water. 2nd International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, IPCBEE vol. 14, IACSIT Press, Singapore.
- Główny Urząd Statystyczny (GUS). (2015). Rocznik statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2015. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Koros, W. J., Ma, Y. H., Shimidzu, T. (1996). Terminology for membranes and membrane processes. *Pure and Applied Chemistry*, 7(68), 1479–1489.
- Kowal, A. L., Świdorska-Bróż, M. (2003). Oczyszczanie wody. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej (KZGW). (2010). Diagnoza aktualnego stanu gospodarki wodnej. Załącznik nr 1 do Projektu Polityki wodnej państwa 2030. Warszawa.
- Mulder, M. (1991). *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London.
- Nawrocki, J. (2010). Uzdatnianie wody. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Nowobilaska-Luberda, A., Nowobilaska, E., Satora, S. (2013). Ujęcia i wody podziemne wykorzystywane dla zaopatrzenia miasta Nowy Targ. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 12(3), 81–91.
- Poskrobko, B., Poskrobko, T., Skiba K. (2007). *Ochrona biosfery*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 13 listopada 2015 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2015, poz. 1989).
- Thorsen, T., Fløgstadt, H. (2006). Nanofiltration in drinking water treatment. *Techneau D5.3.4B report*. <https://www.techneau.org/fileadmin/files/Publications/Publications/Deliverables/D5.3.4b.pdf> (08.02.2018)

FILTRATION OR SEPARATION – COMPARATIVE COST ANALYSIS FOR UNDERGROUND WATER TREATMENT SYSTEM

Abstract. The water supply for population existentially – economic needs use surface water or underground water. As a source, small water supply stations mostly use the underground water, with increased level of iron and manganese. Treatment of such water can be done by conventional methods based on filtration through a bed of gravel or by modern methods, eg. membrane separation (microfiltration, nanofiltration, ultrafiltration, reverse osmosis). Each technology generates specific costs, and therefore a comparative analysis of the costs of classic and membrane technologies has been made for water treatment station with an average efficiency $571 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Investment and operational costs for selected devices

were calculated (assuming the operation time of 30 years) – it has been found that these are comparable for both technologies. The difference amounts to 7.5% and 3% in favor of the classic technology. In the case of construction of a new station classic technology cost is higher than membranes because it requires new building. It is expected that with the increasing popularity of membrane technologies the costs of their use will gradually decrease.

Key words: water treatment, filtration, membrane separation, ultrafiltration, cost analysis

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2017

Do cytowań – For citation: Makowska, M., Krauze, Jan. (2017). Filtracja czy separacja – analiza porównawcza kosztów dla systemów uzdatniania wody podziemnej. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumietus*, 16(4), 155–166.