

# Pilotowa stacja badawcza, dedykowana redukcji materii organicznej, w tym wybranych mikrozanieczyszczeń z wód

The pilot plant of water treatment dedicated for reducing organic matter, including selected micropollutants

IZABELA ZIMOCH, DOMINIK MROCZKO

DOI 10.36119/15.2021.3.6

Wciąż rosnące zainteresowanie mikrozanieczyszczeniami oraz zagrożeniami wynikającymi z ich obecności w ekosystemie wodnym, mogą prowadzić do zaostrzenia przepisów związanych z ich monitoringiem. W niniejszej pracy zebrano wstępne wyniki analizy efektywności redukcji mikrozanieczyszczeń oraz ogólnej materii organicznej wykorzystując procesy alternatywne dla klasycznych technologii uzdatniania wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi. Zaproponowane technologie wdrożone zostały do mobilnej, modułowej stacji badawczej również opisanej w tym artykule. Rozpatrywanymi procesami były: koagulacja, filtracja membranowa, sorpcja i wymiana jonowa oraz fotoliza.

*Słowa kluczowe: koagulacja, membrany, fotoliza, sorpcja, wymiana jonowa*

Constantly growing interest in micropollutants and with threats resulting from their presence in the aquatic ecosystem may result in stricter regulations related to their monitoring. This paper presents results of the preliminary micropollutants and total organics reduction effectiveness analysis, with processes alternative to classical technologies of water treatment intended for human consumption. The proposed technologies are implemented in a mobile, modular pilot plant also described in this paper. The considered processes were: coagulation, membrane filtration, sorption and ion exchange, and photolysis.

*Keywords: coagulation, membranes, photolysis, sorption, ion exchange*

## Wstęp

Zapewnienie odpowiednich parametrów jakościowych wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi, stanowi kluczowy aspekt pracy przedsiębiorstw wodociągowych. Wyzwanie stanowią przede wszystkim te parametry, które powiązane są z obecnością w wodach frakcji organicznej zarówno pochodzenia naturalnego, jak i antropogenicznego. O ile parametry ogólne określające przybliżone całkowite stężenie substancji organicznej, takie jak OWO (Ogólny Węgiel Organiczny) czy utlenialność zazwyczaj podatne są na częściową redukcję w klasycznych układach technologicznych, tak obecność mikrozanieczyszczeń, może wymusić na producentach wody podjęcie działań skierowanych na zwiększenie efektywności redukcji ww. grupy związków.

Mimo relatywnie niskich stężeń, mikrozanieczyszczenia charakteryzują się wysoką toksycznością, zdolnością do bio-

akumulacji oraz niskim stopniem biodegradowalności. Ich obecność w wodach surowych oraz zagrożenia wynikające z ewentualnego przedostawania się do konsumenta są przedmiotem licznych badań naukowych, uregulowań prawnych oraz działań i analiz ryzyka środowiskowego i społecznego międzynarodowych instytucji prozdrowotnych. Uchwalona w 2000 roku z ramienia Parlamentu Europejskiego tzw. Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW) [1] wprowadziła określenie „substancji priorytetowych” oraz określiła strategię mającą na celu poprawę ogólnego stanu ekosystemu wodnego. Między innymi przez identyfikację, monitoring, ograniczenie emisji oraz ostatecznie całkowite wyeliminowanie substancji priorytetowych ze środowiska. Po rozszerzeniu w 2013 roku, lista substancji priorytetowych obejmuje 45 związków organicznych oraz nieorganicznych, strategicznych w kontekście spełnienia wyżej wymienionych celów [2]. Dotychczas obowiązek monitorowa-

nia nałożony przez instytucje unijne dotyczy jedynie wód naturalnych, biorąc jednak pod uwagę rosnące wymagania jakościowe co do wód trafiających do konsumentów, nowa DWD w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi wprowadziła wartość parametryczną m. in. dla bisfenolu A.

W kontekście redukcji mikrozanieczyszczeń w wodach przeznaczonych do spożycia, efektywność klasycznych procesów technologicznych jest trudna do ewaluacji z uwagi na naturę samych mikrozanieczyszczeń [4-6]. Stopień powinowactwa do wody, jak również parametry matrycy wodnej mają kluczowy wpływ na skuteczność redukcji tych związków. W procesie koagulacji, mechanizm redukcji mikrozanieczyszczeń oparty jest głównie o proces adsorpcji na flokulach pokoagulacyjnych. Potencjał adsorpcji poszczególnych związków można ocenić na bazie współczynnika podziału oktanol-woda  $\log P_{o/w}$  [7-8]:

Prof. dr hab. inż. Izabela Zimoch - Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, Gliwice, <https://orcid.org/0000-0003-3048-4002>, mgr inż. Dominik Mroczko - Doktorant programu „Doktorat wdrożeniowy”, Adres do korespondencji/Corresponding author: [izabela.zimoch@polsl.pl](mailto:izabela.zimoch@polsl.pl)

- $\log P_{o/w} < 2,5$  niski potencjał sorpcji;
- $\log P_{o/w} > 2,5$  and  $< 4,0$  średni potencjał sorpcji;
- $\log P_{o/w} > 4,0$  wysoki potencjał sorpcji.

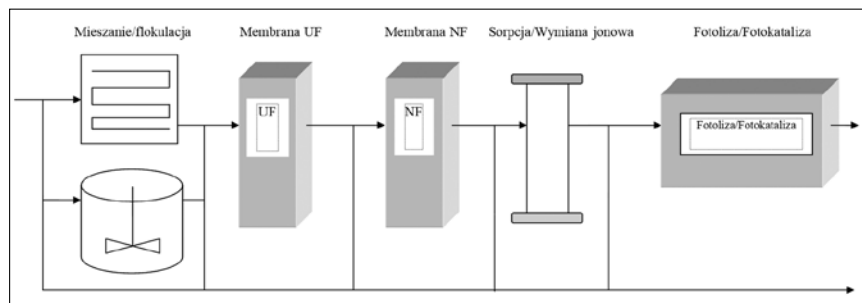
Sytuacja wygląda podobnie w przypadku procesu sorpcji na węglu aktywnym. Tutaj jednak duże znaczenie ma obecność wysokocząsteczkowych związków współtworzących materię organiczną matrycy. Substancje huminowe oraz fulwowe mogą limitować efektywność procesu przez blokowanie miejsc aktywnych sorbentu [9-10]. Skutkuje to tym, że w przypadku większości mikrozanieczyszczeń niemal niemożliwym jest osiągnięcie całkowitej redukcji metodami konwencjonalnymi.

Rosnąca świadomość na temat zagrożeń zdrowotnych powodowanych mikrozanieczyszczeniami pociągnęła za sobą rozwój metod analitycznych, jak również technologii ich redukcji. Bazując na dostępnych danych wyróżnić można przede wszystkim technologie oparte na sorpcji, wymianie jonowej, filtracji membranowej oraz tzw. zaawansowanych procesach utleniania (AOP) [11-14]. Techniki te, coraz częściej spotkać można w oczyszczalniach ścieków lub wody technologicznej, lecz pozostają one niszowe w kontekście uzdatniania wód trafiających do sieci wodociągowej.

W niniejszej pracy przedstawiono układ pilotowej stacji badawczej, w której wykorzystano techniki alternatywne dla klasycznych technologii uzdatniania wód przeznaczonych do spożycia. Urządzenie powstało z myślą o przyszłych wyzwaniach, z jakimi zmierzyć się mogą przedsiębiorstwa wodociągowe. Integralnym elementem artykułu jest prezentacja wyników badań przeprowadzonych w skali laboratoryjnej, służących ocenie skuteczności wybranych procesów. Analizie poddano efektywność poszczególnych technologii w kontekście redukcji substancji organicznej oraz wybranych związków priorytetowych.

## Opis procesu

Stacja pilotowa przeznaczana jest przede wszystkim do maksymalizacji redukcji materii organicznej oraz stanowi narzędzie pozwalające określić efektywność redukcji poszczególnych mikrozanieczyszczeń z matrycy wodnej. Technologiami, na których opiera się stacja są: koagulacja, procesy membranowe (ultra – oraz nanofiltracja), sorpcja i wymiana jonowa, oraz fotoliza. Walorem badawczym stacji jest modułowość poszczególnych procesów. Założeniem urządzenia jest możli-



Rys.1.  
Schemat blokowy stacji pilotowej

wość dowolnego kompilowania procesów, tak aby uzyskać maksymalne efekty oczyszczania wód o różnych parametrach. Schemat blokowy stacji przedstawiono na rysunku 1.

## Koagulacja

Proces koagulacji ma szczególne znaczenie w przypadku ujęć wód powierzchniowych. Koagulacja zwykle skutkuje wysokim stopniem redukcji materii organicznej, będąc jednocześnie procesem wstępnym, pozwalającym na prowadzenie dalszych etapów oczyszczania ze zdecydowanie wyższą wydajnością. W zaproponowanym układzie badawczym prowadzenie procesu jest możliwe do zrealizowania w dwóch wariantach:

- w cylindrycznym zbiorniku o pojemności  $1\text{m}^3$  wyposażonym w mieszadło wolnoobrotowe. Proces realizowany jest porcjowo. Po napełnieniu zbiornika następuje dozowanie odpowiedniej dawki koagulantu i prowadzony jest proces. Czas trwania procesu dobierany jest indywidualnie metodą testów zlewkowych. Po zakończeniu procesu, woda wraz z osadem podawane są na membranę mikrofiltracyjną.
- we flokulatorze rurowym, w którym wymieszanie koagulantu oraz flokulacja odbywać się będzie dzięki mieszalnikom statycznym. Konstrukcja ma 20 metrów długości całkowitej i zmienne przekroje. Pierwsze 3 metry o średnicy  $d=50\text{mm}$  służą szybkiemu wymieszaniu, na kolejnych 17 metrach o średnicy  $d=75\text{mm}$  zachodzi proces flokulacji. Skoagulowana woda następnie trafia na membranę mikrofiltracyjną.

Możliwość wyboru technologii procesu pozwala na bardziej precyzyjne dostosowanie się do warunków technologicznych w rzeczywistych obiektach.

## Procesy membranowe

Technologie membranowe zaproponowane zostały ze względu na znaną, wysoką efektywność oczyszczania zarówno

wód, jak i ścieków. W urządzeniu badawczym wykorzystane są procesy membranowe: mikro-, ultra – oraz nanofiltracji. Mikrofiltracja służy jako wstępny filtr zawiesiny mineralnej, lub po procesie koagulacji jako separator osadu pokoagulacyjnego. Procesy ultra – i nanofiltracji wykorzystywane mogą być alternatywnie w zależności od wymaganych parametrów jakości wody uzdatnionej.

## Sorpcja i wymiana jonowa

Proces wymiany jonowej realizowany jest w kolumnach cylindrycznych, w których możliwe jest uzyskanie maksymalnej wysokości złoża na poziomie 150 cm. Aby usprawnić sterowanie procesem, moduł filtracji kolumnowej składa się z trzech kolumn mogących funkcjonować szeregowo lub równolegle. Dodatkowo kolumny mogą pracować z różnym wypełnieniem jednocześnie (np. piasek, zeolit, czy węgiel aktywny).

## Fotoliza i fotokataliza

Moduł umożliwiający prowadzenie procesów fotolizy oraz fotoutleniania ma charakter reaktora porcjowego. Reaktor składa się ze zbiornika o objętości  $1\text{m}^3$  oraz przepływowej lampy UV-C. Proces realizowany jest w układzie recyrkulacji oczyszczanego medium przez lampę do uzyskania założonego stopnia destrukcji redukowanych związków. Z reaktorem sprzężony jest ozonator dostarczający do układu  $\text{O}_3$ . Możliwe jest również podawanie utleniacza w postaci roztworu (np.  $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

## Metodyka badań

### Porównanie skuteczności koagulantów oraz analiza redukcji wybranych mikrozanieczyszczeń

Przeprowadzono badania skuteczności redukcji materii organicznej podczas koagulacji z wykorzystaniem czterech rodzajów koagulantów glinowych. Badania były częścią prac mających na celu ocenę możliwości wykorzystania analizy potencjału zeta w predykcji dawki koagulantu [15].

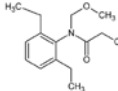
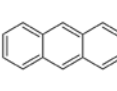
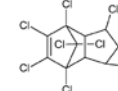
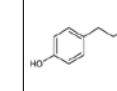
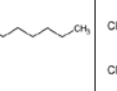
Wykorzystano dwa tradycyjne koagulanty hydrolizujące: siarczan glinu oraz chlorek poliglinu (PAC) oraz dwa wstępnie zhydrolizowane koagulanty wysokozasadowe: chlorowodorotlenek poliglinu (PACl) oraz polichlorosiarczan glinu (PACS).

Badaniom [16] poddano również skuteczność redukcji wybranych pięciu mikrozanieczyszczeń. Przedmiotem analizy były dwie wody powierzchniowe o wysokim (rzeka Mała Panew) i niskim (jeziro Dobromierz) stężeniu materii organicznej (tab. 1) oraz woda demineralizowana. Wody zaszczerpiono mikrozanieczyszczeniami do poziomu 20 µg L<sup>-1</sup> dla każdej substancji, a następnie poddano procesowi koagulacji z wykorzystaniem trzech koagulantów glinowych: siarczan glinu, PAC, PACl. Ponadto pracami objęto badania i analizę wpływu zastosowania polielektrolitów organicznych: Praestol<sup>TM</sup> 2540TR (anionowy), Praestol<sup>TM</sup> 655BC (kationowy) i Praestol<sup>TM</sup> 2500TR (niejonowy), na redukcję mikrozanieczyszczeń. Substancje poddawane redukcji wymieniono w tabeli 2.

**Tab. 1. Charakterystyka wód surowych**

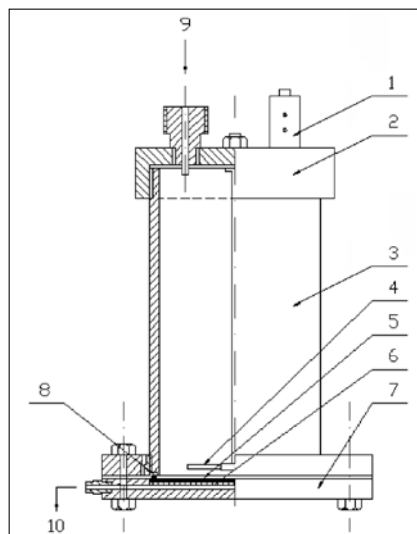
Woda	pH	OWO [mg L <sup>-1</sup> ]	RWO [mg L <sup>-1</sup> ]	Abs <sub>254</sub>
Mała Panew	7.86	17.45	13.52	1.76
Dobromierz	7.12	4.40	4.26	0.297

**Tab.2. Charakterystyka analizowanych substancji**

	Alachlor, Acl	Antracen, Ant	Epoksyd Heptachloru, Hcl-e	4-nonylofenol, Npl	Heptachlor, Hcl
Struktura					
logP <sub>o/w</sub>	2.99	3.99	4.45	4.68	5.24

**Dobór membran ultra – i nanofiltracyjnych**

Przeprowadzono wstępne badania, w których testowano efektywność redukcji materii organicznej. Obiektem badań była woda powierzchniowa, wstępnie poddana procesowi koagulacji. Proces filtracji membranowej prowadzono w systemie *dead-end* (rys. 2) stosując maksymalny stopień odzysku permeatu wynoszący 80%. Wartości ciśnienia transmembranowego dla



**Rys.2.** Schemat aparatu do testowania membran w systemie jednokierunkowym: 1-zawór bezpieczeństwa, 2-pokrywa górna, 3-ciśnieniowy cylindryczny zbiornik nadawy, 4-mieszadło magnetyczne, 5-membrana, 6-płyta perforowana, 7-pokrywa dolna, 8-uszczalka, 9-doprowadzanie gazu, 10-odprowadzanie permeatu

procesów ultra – i nanofiltracji wynosiły odpowiednio 0,2 MPa i 2,0 MPa. Charakterystykę membran wykorzystanych w badaniach przedstawiono w tabeli 3.

Zjawisko blokowania powierzchni membrany określono poprzez wyznaczenie jej względnej przepuszczalności (α) będącej ilorazem strumieni wyznaczonych

dla membrany nowej (J<sub>w</sub>) i po procesie (J<sub>v</sub>) wyliczanych z zależności:

$$J_v(J_w) = \frac{V}{F \cdot t}, \frac{m^2}{m^2 \cdot s}$$

$$\alpha = \frac{J_w}{J_v}$$

gdzie:

- V – objętość;
- F – powierzchnia membrany,
- t – czas.

**Tab 3. Charakterystyka membran (dane producenta)**

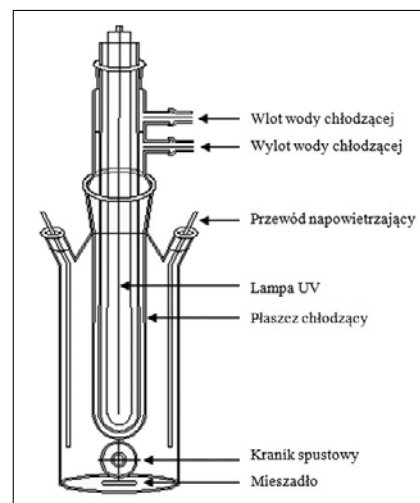
Proces	Producent	Materiał	Symbol	Cut-off, Da	Retencja soli, % MgSO <sub>4</sub>
UF	Synder <sup>TM</sup>	PVDF	A6	500 000	-
			BX	250 000	-
			BY	100 000	-
			BN	50 000	-
NF	Dow Filmtec <sup>TM</sup>	poliamid/kompozyt	NF-90	100-200	98,7
			NF-270	150-300	97

**Redukcja wybranych mikrozanieczyszczeń w procesach wymiany jonowej i sorpcji [14]**

Przeprowadzono badania redukcji pięciu wybranych mikrozanieczyszczeń w procesach wymiany jonowej na dwóch jonitach (anionit i kationit) oraz granulowanym węglu aktywnym. Obiektem badań były wody, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 1. Filtracji poddano zarówno wody surowe jak też poprzedzone procesem koagulacji. Do badań wykorzystano żywice Lewatit<sup>®</sup> S5428 (anionit) i Lewatit<sup>®</sup> TP207 (kationit) oraz granulowany węgiel aktywny Norit<sup>®</sup> GAC830. Analizowane mikrozanieczyszczenia wymieniono w tabeli 2.

**Wstępna analiza skuteczności redukcji materii organicznej w procesie fotolizy**

Oceniono skuteczność redukcji materii organicznej z wody w procesie fotolizy oraz fotoutleniania. Proces prowadzono w porcyjowym reaktorze o objętości 0,6 dm<sup>3</sup> wyposażonym w średnicę ciśnieniową lampę zanurzeniową UV o mocy 150 W (rys. 3). Fotolizę katalizowano stosując: ditlenek wodoru (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) w dawce 15 mg/dm<sup>3</sup> (roztwór 30%), ozonowanie (O<sub>3</sub>) w dawce 10 mg/dm<sup>3</sup> i dwutlenek tytanu (TiO<sub>2</sub>) w dawce 500 mg/dm<sup>3</sup>. Próbkę do analizy pobierano po 15, 30 i 60 minutach reakcji.

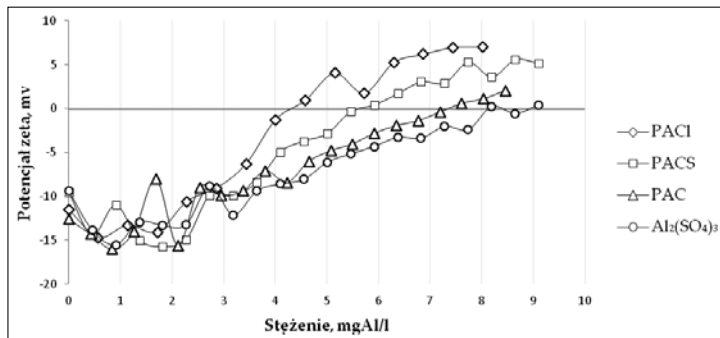


**Rys. 3.** Reaktor UV

**Analiza wyników badań**

**Koagulacja**

Analiza [13-14] zmian potencjału zeta (rys.2) wykazała, że neutralizacja zanieczyszczeń koloidalnych (potencjał zeta osiągnął wartość 0 mV, tzw. punkt izoelektryczny) nastąpiła najszybciej wobec zastosowania koagulantów wstępnie zhydrolizowanych. Skuteczność koagulacji sprawdzono w dawkach odpowiadających



Rys.2. Zmiana wartości potencjału zeta w zależności od dawki koagulantów

go wpływu na efektywność procesu. Jedynie wykorzystanie flokulantu kationowego nieznacznie poprawiło efekty redukcji. Wyniki przedstawiono na rysunkach 3-5.

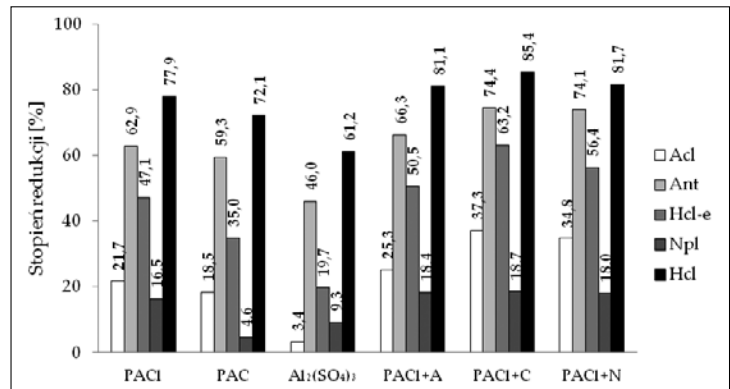
Procesy membranowe

Wyniki oczyszczania wód w procesie ultra- i nanofiltracji przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Efektywność redukcji materii organicznej na membranach ultrafiltracyjnych wynosiła maksymalnie 20%.

punktowi izoelektrycznemu. Wykazano [13-14], że pomimo zdecydowanie niższych dawek, koagulanty wstępnie zhydrolizowane charakteryzowały się podobną lub wyższą efektywnością redukcji materii organicznej. Na niekorzyść koagulantów tradycyjnych przemawiały również wyniki analizy glinu resztkowego (wzrost stężenia) oraz widoczny spadek odczynu i zasadowości wody uzdatnionej. Wyniki zobrazowano w tabeli 4.

Badania redukcji mikrozanieczyszczeń wykazały, że kluczowy wpływ na efektyw-

Rys.3. Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń; Mała Panew



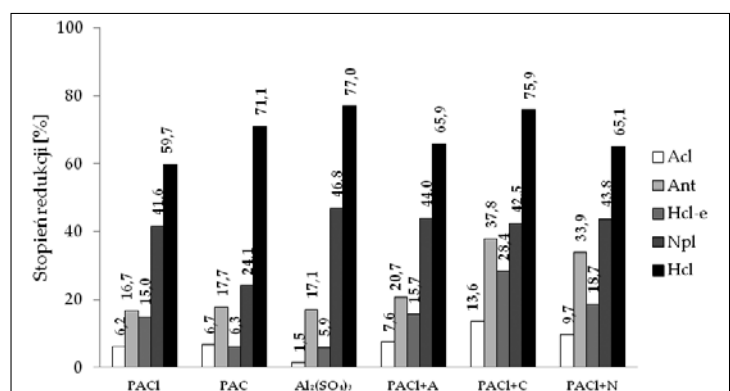
Tab.4. Efektywność procesu koagulacji

Parametr	Woda surowa	PACI, 38 mg/l	PACS, 62 mg/l	PAC, 87 mg/l	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , 98 mg/l
pH	7,95	7,81	7,75	6,91	6,48
Zasadowość, mval/l	1,95	1,87	1,84	1,40	1,01
Barwa, mgPt/l	53	6	5	5	5
Mętność, NTU	10,9	0,77	0,77	0,84	1,78
Abs <sub>254</sub>	0,995	0,316	0,330	0,323	0,317
OWO, mg/l	6,48	3,73	3,94	4,00	3,85
RWO, mg/l	6,28	3,70	3,82	3,98	3,73
Al, µg/l	92,7	97,7	23,5	206,2	712,3

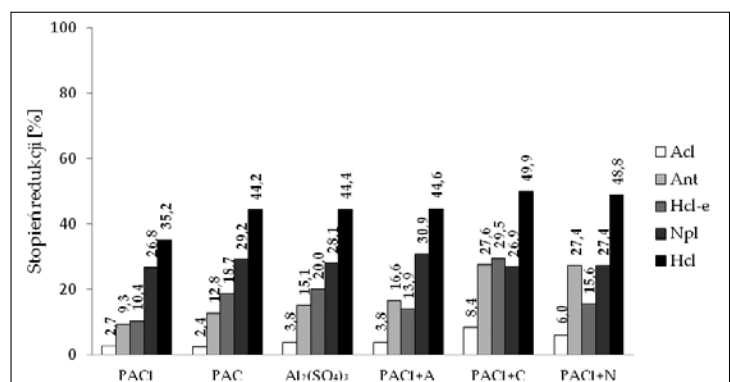
Membrana BN o cut-off 50kDa okazała się najbardziej skuteczna, jednocześnie najbardziej odporna na blokowanie ( $\alpha=0,72$ ). W przypadku nanofiltracji maksymalna skuteczność redukcji materii organicznej wyniosła niemal 100 % i została osiągnięta z wykorzystaniem membrany NF-90. Membrana NF-270 wykazała 80% skuteczność, lecz jej efektywność widocznie spadła w trakcie trwania procesu.

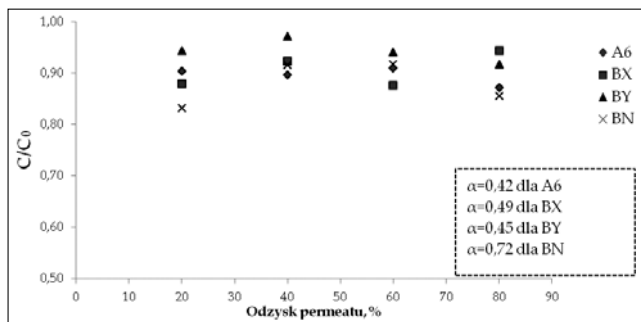
ność procesu ma skład matrycy. W przypadku wody preparowanej, w której z uwagi na brak cząstek koloidalnych koagulacja nie zachodziła, mechanizm redukcji mikrozanieczyszczeń opierał się jedynie na procesie adsorpcji na generowanym wodorotlenku glinu. Skuteczność redukcji w tym przypadku zależała przede wszystkim od charakterystyki ( $\log P_{o/w}$ ) poszczególnych substancji i w ogólnym rozrachunku była najniższa. Zauważono również, że koagulanty hydrolyzujące charakteryzowała wyższa efektywność, co mogło wynikać z ich tendencji do przechodzenia w próbkę w nierozpuszczalny wodorotlenek glinu, na którym zachodził proces sorpcji. Efektywność usuwania mikrozanieczyszczeń w wodach naturalnych zależała od ich pierwotnego obciążenia. W wodzie, w której zawartość frakcji organicznej była większa, efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń również była wyższa. Było to prawdopodobnie spowodowane większą ilością osadu pokoagulacyjnego, a więc większą powierzchnią adsorpcyjną. Zastosowanie polielektrolitów nie miało większe-

Rys.4. Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń; Dobromierz

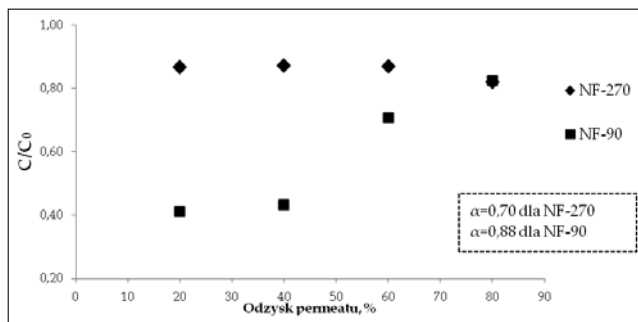


Rys.5. Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń; Woda preparowana





**Rys. 7.** Efektywność redukcji węgla organicznego na membranach ultrafiltracyjnych



**Rys. 8.** Efektywność redukcji węgla organicznego na membranach nanofiltracyjnych

### Sorpcja i wymiana jonowa [14]

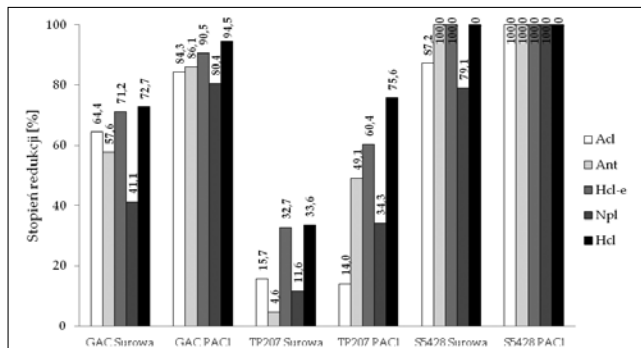
Procentową redukcję substancji przedstawiono na rysunkach 9-11. Proces wymiany jonowej z wykorzystaniem żywicy anionowymiennej skutkował redukcją mikrozanieczyszczeń w zakresie 79,1 – 100%. Najlepsze efekty, niezależnie od obciążenia

matrycy, data kompilacja procesu koagulacji oraz wymiany jonowej z wykorzystaniem anionitu – 100% redukcji każdego analizowanego związku. Efektywność procesu sorpcji na węglu aktywnym zależała od obciążenia matrycy i była największa dla wody preparowanej. Efektywność żywi-

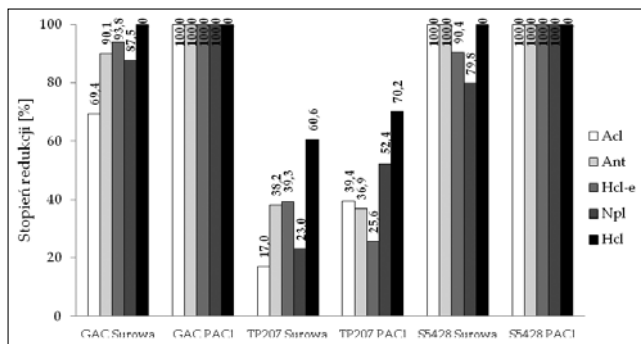
cy kationitowej była widocznie mniejsza, niż w przypadku dwóch pozostałych mediów filtrujących.

### Fotoliza

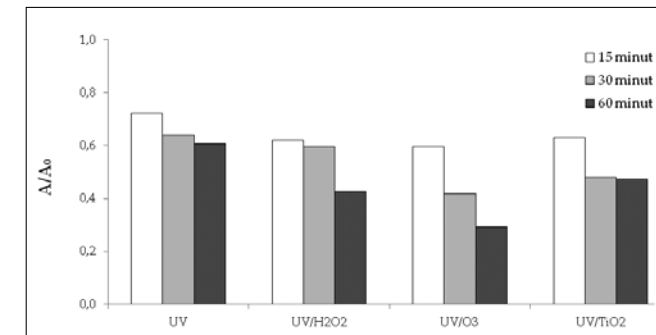
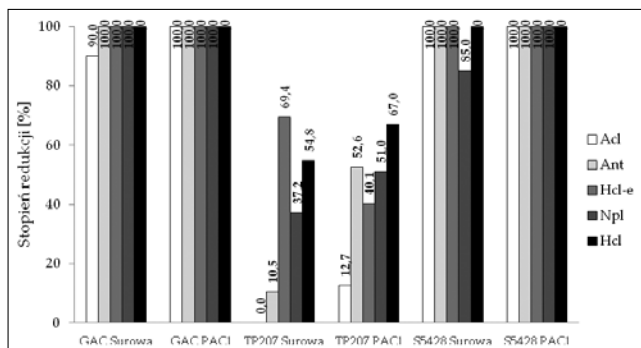
Wyniki redukcji OWO oraz absorbancji (254nm) przedstawiono na rysun-



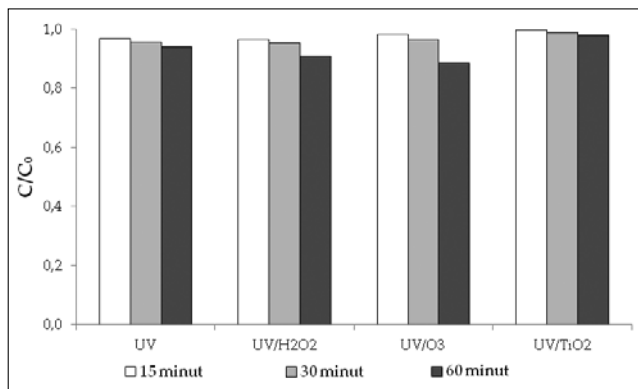
**Rys. 9.** Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń w procesie sorpcji i wymiany jonowej; Mała Panew



**Rys. 10.** Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń w procesie sorpcji i wymiany jonowej; Dobromierz



**Rys. 13.** Efektywność procesów fotolitycznych (absorbancja)



**Rys. 14.** Efektywność procesów fotolitycznych (OWO)

**Rys. 11.** Efektywność redukcji mikrozanieczyszczeń w procesie sorpcji i wymiany jonowej; Woda preparowana

kach 13 i 14. Efektywność redukcji zależała od czasu prowadzenia procesu. Spośród testowanych układów największą, 70% efektywność redukcji absorbancji wykazała konfiguracja UV/O<sub>3</sub>. Należy zaznaczyć, że spadek wartości absorbancji nie miał odwzorowania w redukcji OWO. Świadczy to o tym, że w zaproponowanych warunkach nie udało się całkowicie zmineralizować materii organicznej, a jedynie przekształcić substancje wchodzące w jej skład.

## Podsumowanie

Koncepcja zaprezentowanej stacji badawczej, pozwalającej wykorzystać techniki wciąż jeszcze niszowe w kontekście uzdatniania wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi, była wyjściem naprzeciw wyzwaniom, przed jakimi w niedalekiej przyszłości może stanąć środowisko ludzi związanych z ochroną zasobów wodnych. W pracy przedstawiono opis proponowanej technologii, w której wdrożono procesy o udowodnionej, wysokiej efektywności redukcji zarówno ogólnej materii organicznej, jak również mikrozanieczyszczeń. Przedstawione wyniki obrazują dużą efektywność poszczególnych procesów. Założenia projektowe budowy stacji jako układu modułowego procesów technologicznych pozwalają na indywidualny dobór procesów jednostkowych i dogłębną analizę ich efektywności w celu wyznaczenia wytycznych do zaprojektowania rzeczywistego układu technologicznego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, Official Journal of the European Communities, 2000, OJ L 327, 22.12.2000, p. 1–73.
- [2] Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy, Official Journal of the European Communities, 2013, OJ L 226, 24.8.2013, p. 1–17.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, 23.12.2020 r., L 435/1
- [4] Y. Luo, W. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai, J. Zhang, S. Liang, X.C. Wang, A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Sci Total Environ*, 473-474 (2014) 619-641
- [5] M. Cirja, P. Ivashechkin, A. Shaffer, P.F.X. Corvini, Factors affecting the removal of organic micropollutants from wastewater in conventional treatment plants (CTP) and membrane bioreactors (MBR), *Environ Sci Biotechnol*, 7 (2008) 61-78
- [6] Pruss A., Pruss P., Rola badań technologicznych wody w procesie inwestycyjnym, *Instal*, nr.7-8, 2016
- [7] S.A. Snyder, P. Westerhoff, Y. Yoon, D.L. Sedlak, Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: Implications for the water industry, *Environ Eng Sci*, 20 (2003) 449-469
- [8] H.R. Rogers, Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges, *Sci Total Environ*, 185 (1996) 3-2
- [9] L. Ding, V.L. Snoeyink, B.J. Marinas, Z. Yue, J. Economy, Effects of Powdered Activated Carbon Pore Size Distribution on the Competitive Adsorption of Aqueous Atrazine and Natural Organic Matter, *Environ Sci Technol*, 42 (2008), 1227-1231
- [10] E. Worch E. Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes, and modeling, De Gruyter, Berlin 2012
- [11] F. Meinel, A.S. Ruhl, A. Sperlich, F. Zietzschmann, M. Jekel, Pilot-Scale Investigation of Micropollutant Removal with Granular and Powdered Activated Carbon, *Water Air Soil Poll*, 226 (2015), 2260
- [12] H.T. Madsen, Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water, Chapter 6, 2014, 199-248
- [13] P. Battistoni, E. Cola, F. Fatone, D. Bolzonella, A.L. Eusebi, Micropollutants removal and operating strategies in ultrafiltration membrane systems for municipal wastewater treatment: Preliminary results, *Ind Eng Chem*, 46 (2007) 6716-6723
- [14] N. De la Cruz, L. Esquivel, D. Grandjean, A. Magnet, A. Tunler, L.F. de Alencastro, C. Pulgarin, Degradation of emergent contaminants by UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and neutral photo-Fenton at pilot scale in domestic wastewater treatment plant, *Water Res*, 47 (2013), 5836-5845
- [15] I. Zimoch, D. Mroczko, The use of Zeta Potential Measurement as a Control Tool of Surface Water Coagulation, *J. Environ. Eng*, 21 (2020), 237-242
- [16] I. Zimoch, D. Mroczko, Effectiveness of coagulation, sorption, and ion exchange processes in reduction of selected priority substances from surface waters, *Desalination Water Treat*, 199 (2020) 212–219