

Maciej DOBRZAŃSKI, Andrzej JODŁOWSKI*

WPLYW TEMPERATURY NA OCZYSZCZANIE SZARYCH ŚCIEKÓW W ŚWIETLE MODELU HYDRAULICZNEGO

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu temperatury nadawy na oczyszczanie szarych ścieków w procesie ultrafiltracji. Do opisu przebiegu procesu oczyszczania wykorzystano model hydrauliczny, opierający się na oporze membrany i oporach wynikających z blokowania przegrody filtracyjnej. Badania zrealizowano wykorzystując sporządzone szare ścieki imitujące ścieki z prania, które były oczyszczane na membranach ultrafiltracyjnych o mikronażu 10, 100 i 1000 kDa.

Stwierdzono, silny wpływ temperatury nadawy na skuteczność oczyszczania szarych ścieków oraz na wielkość strumienia przepływu przez membranę. Przy wyższej temperaturze nadawy stwierdzono niższą skuteczność oczyszczania i wyższy strumień permeatu niż przy niższej temperaturze. Ponadto zastosowany model hydrauliczny pozwala zaobserwować zmianę oporów membrany pod wpływem różny temperatur.

1. WSTĘP

Odzysk wody z szarych ścieków jest coraz częściej stosowany jako rozwiązanie proekologiczne w budownictwie. Z uwagi na to prowadzone są badania dotyczące oczyszczania szarych ścieków różnymi metodami, z uwzględnieniem szeregu zmiennych parametrów. Jednym z nich jest temperatura ścieków. Ścieki bytowe charakteryzują się zróżnicowaną temperaturą z uwagi na mieszanie się wody ciepłej i zimnej używanej w przyborach sanitarnych. Może się ona zmieniać w zakresie od 15 °C do 80 °C [1]. Z przeprowadzonych badań w gospodarstwie domowym [3], w którym zastosowano zbiornik magazynujący szare ścieki, wynika że temperatura wahała się w granicach 20–50 °C. Tak duża rozpiętość może powodować różnice w efektywności oczyszczania szarych ścieków, a także wpływać negatywnie na elementy układu oczyszczającego. Odpowiednie oczyszczenie ścieków powstających podczas korzy-

* Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, al. Politechniki 6, maciej.dobrzanski@p.lodz.pl.

stania z prysznica, umywalki i pralki stwarza możliwość odzysku wody i jej powtórnego wykorzystania, a tym samym zmniejszenia zapotrzebowania na wodę wodociągową [5]. Jak podają Ghisi i Ferreira [2] możliwe jest osiągnięcie oszczędności na poziomie 30 do 35% całkowitego zużycia wody. Jednakże, aby uzyskać tak wysoką skuteczność należy odpowiednio oczyścić szare ścieki.

W dostępnej literaturze brak jest opracowań dotyczących analizy wpływu temperatury nadawy na proces oczyszczania szarych ścieków. Badacze koncentrują się przeważnie nad określeniem zużycia wody i częstotliwości wykorzystywania z poszczególnych przyborów sanitarnych w obiektach budowlanych oraz nad ogólną skutecznością oczyszczania szarych ścieków.

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem temperatury nadawy na efektywność oczyszczania szarych ścieków oraz na wielkość strumienia permeatu. Celem pracy było określenie kinetyki oporu odwracalnego w zależności od temperatury w świetle modelu hydraulicznego podczas ultrafiltracji [3].

2. METODYKA BADAŃ

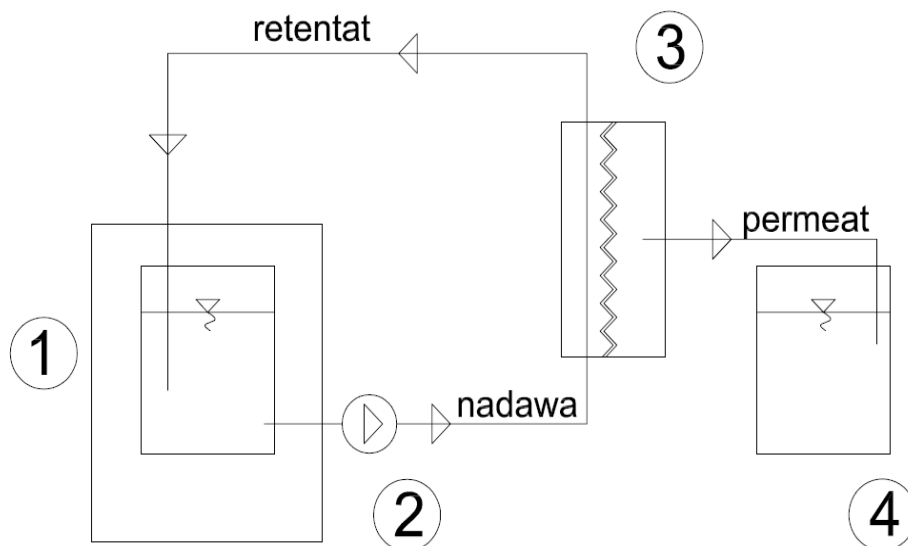
2.1. PRZEDMIOT BADAŃ

Badanie zostało przeprowadzone z użyciem sporządzonych szarych ścieków przygotowywanych z przyjętych i odmierzonych wagowo składników (2,77 g proszku na 1 litr wody). W jej skład wchodziły elementy imitujące główne zanieczyszczenia ścieków z prania tzn. detergenty (proszek firmy Vizir do białego). Tak przygotowana szara woda miała właściwości zbliżone do ścieków z pralek domowych pod względem stężenia detergentów niejonowych i anionowych. Syntetyczne szare ścieki przygotowywane według tych samych zasad ujednoliciły badane medium we wszystkich przeprowadzanych doświadczeniach. Głównymi zanieczyszczeniami przed etapem filtracji wstępnej były detergenty i substancje nierozpuszczone, natomiast przed etapem ultrafiltracji detergenty, substancje rozpuszczone.

2.2. STANOWISKO BADAWCZE

W pierwszym etapie badania zastosowano sącdek jakościowo-ilościowy, w celu zabezpieczenia membrany przed nadmiernym blokowaniem spowodowanym substancjami nierozpuszczonymi. Następnie szare ścieki były przelewane do układu wyposażonego w termostat umożliwiający utrzymanie zadanej temperatury nadawy (rys. 1). Badanie prowadzono w temperaturze 22, 33 i 40°C.

Podczas ultrafiltracyjnego oczyszczania wykorzystano laboratoryjne urządzenie Labscale TFF firmy Millipore. W badaniu zastosowano kasety Pellicon XL Biomax, o powierzchni $0,005 \text{ m}^2$ i wielkościach porów 10, 100 i 1000 kDa.



Rys. 1. Schemat stanowiska: 1 – układ termostatyczny, 2 – pompa nadawy, 3 – kasetę membranową o przepływie krzyżowym, 4 – zlewka permeatu

W tabeli 1 przedstawiono charakterystyki kaset. Wykonane są one z takiego samego materiału, charakteryzują się identycznymi parametrami pracy, różnią się jedynie wielkością porów.

Tabela 1. Charakterystyka kaset membranowych o mikronaży 10, 100 i 1000 kDa
(www.milipore.com/catalogue/module)

Opis:	Pellicon XL Ultrafiltracja Moduł Biomax
Mikronaż, kDa	10/100/1000
Materiał filtra	polieterosulfon
Materiał warstwy podtrzymującej	polipropylen
Typ filtra	ultrafiltracja
Zakres pH	1–14
Max. ciśnienie wlotowe, bar	5,5
Max. ciśnienie transmem., bar	2,8
Max. temperatura nadawy, °C	50°C
Powierzchnia filtracji, cm^2	50

2.3. KINETYKA ULTRAFILTRACJI

Do opisu przebiegu procesu ultrafiltracji wykorzystano model hydrauliczny. Opiera się on na podstawowej zależności (1) i wyznaczeniu składowych oporów występującego podczas filtracji. Opór całkowity R_c składa się z oporu membrany R_m , oporu odwracalnego R_{fo} oraz oporu nieodwracalnego R_{fn} według zależność (2) [4].

$$J_v = \frac{\Delta P}{\eta \cdot R_c} \quad (1)$$

$$J_v = \frac{\Delta P}{\eta \cdot (R_m + R_{fo} + R_{fn})} \quad (2)$$

w której:

J_v – objętościowy strumień roztworu [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$]

ΔP – ciśnienie transmembranowe [Pa];

η – lepkość nadawy [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$];

R_c – opór całkowity [$1/\text{m}$];

R_m – opór membrany [$1/\text{m}$];

R_{fo} – opór odwracalny [$1/\text{m}$];

R_{fn} – opór nieodwracalny [$1/\text{m}$].

Ostatecznie model hydrauliczny opisuje zależność zmiany oporu odwracalnego od czasu filtracji (3).

$$R_{fo} = R_\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{R0}}\right) \right] \quad (3)$$

w której:

R_{fo} – opór związany z odwrac. blokowaniem membrany ($R_{fo} = 0$ przy $t = 0$), [$1/\text{m}$]

R_∞ – opór związany z odwracalnym blokowaniem membrany po nieskończone długim czasie, [$1/\text{m}$]

t_{R0} – współczynnik równania, [$1/\text{s}$].

Opór odwracalny membrany jest oporem możliwym do usunięcia poprzez płukanie membrany. Dzięki modelowi hydraulicznemu możliwe jest wyznaczenie optymalnego czasu pracy membrany.

W doświadczeniu mierzonymi wielkościami był czas filtracji t określonej objętości permeatu V_p .

Istotnym parametrem procesu jest **temperatura cieczy**. Wpływa ona na lepkość cieczy a przez to na skuteczność filtracji. Zależność zmiany wartości lepkości dynamicznej od temperatury opisuje równanie Arrheniusa-Guzmana:

$$\eta = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (4)$$

w którym:

η – lepkość dynamiczna cieczy

A, B – stałe wielkości charakterystyczne dla danej cieczy

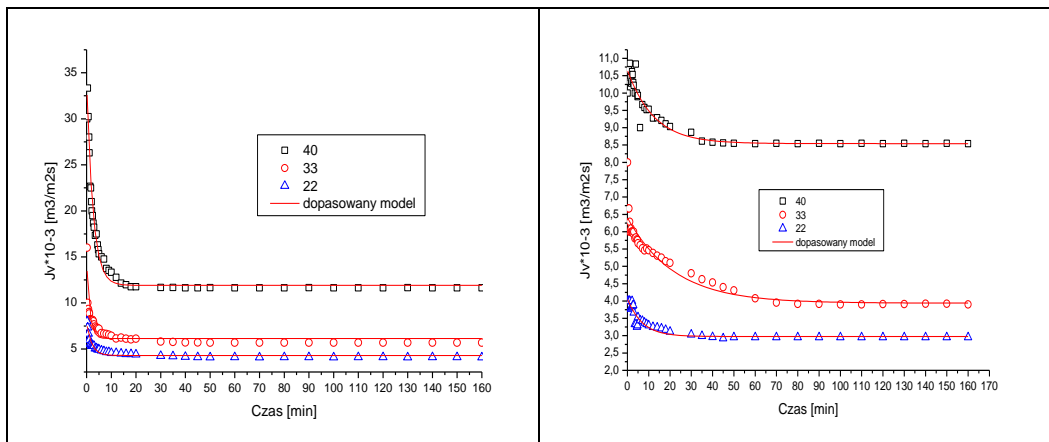
T – temperatura cieczy.

Analizując powyższe formuły matematyczne, według równania (4) wzrost temperatury przekłada się na spadek lepkości dynamicznej cieczy, a tym samym zgodnie z równaniami (1 lub 2) na wzrost wielkości strumienia J_v .

3. OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

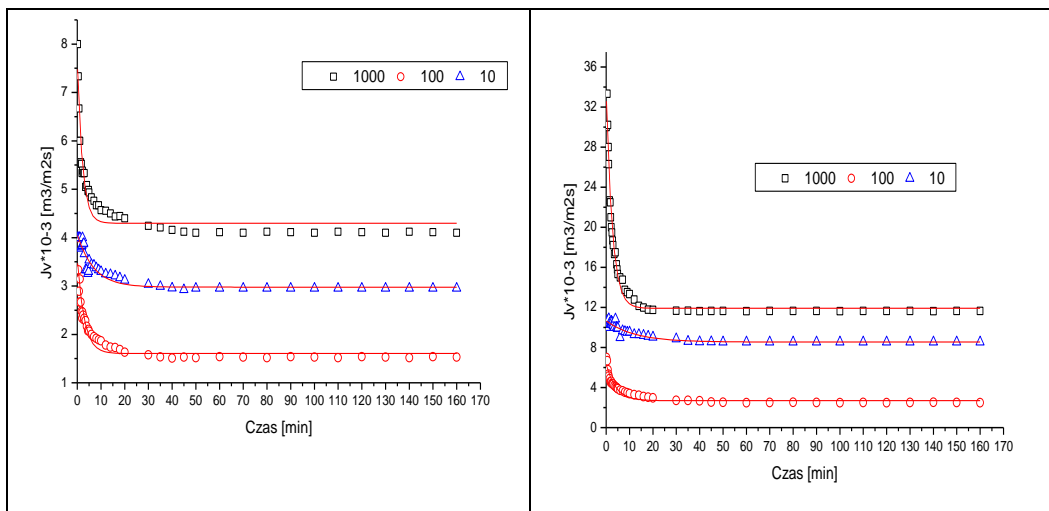
3.1. KINETYKA PROCESU ULTRAFILTRACJI

Podczas każdej filtracji przez membranę mierzono objętość permeatu uzyskiwanego w czasie realizacji doświadczenia, co pozwoliło na obliczenie objętościowego strumienia permeatu J_v . Na rysunkach 2-5 przedstawiono wybrane zależności zmiany strumienia J_v w czasie dla trzech temperatur nadawy. Z uzyskanych danych dla poszczególnych membran zaobserwowano wyraźny wpływ temperatury szarych ścieków na strumień permeatu. Przy wyższych temperaturach uzyskano większy przepływ (rys. 2 i 3) lecz jednocześnie bardziej dynamiczny spadek przepływu w początkowej fazie filtracji (w czasie ok. 10 min). Zwiększony przepływ przy podwyższonej temperaturze można tłumaczyć zmniejszoną lepkością cieczy, a tym samym mniejszymi oporami hydraulicznymi. Natomiast większa dynamika spadku przepływu może wynikać ze zmian w strukturze i wielkości porów membrany, co przełożyło się na zwiększone jej blokowanie. Porównując zmierzone natężenia przepływu dla trzech membran przy każdej temperaturze nadawy, ich zmiana nie była uzależniona do zmiany mikronażu (rys. 4 i 5).



Rys. 2. Zależność strumienia permeatu od czasu dla membrany 1000 kDa dla trzech temperatur nadawy (stałe TMP = 25 psi)

Rys. 3. Zależność strumienia permeatu od czasu dla membrany 10 kDa dla trzech temperatur nadawy (stałe TMP = 25 psi)

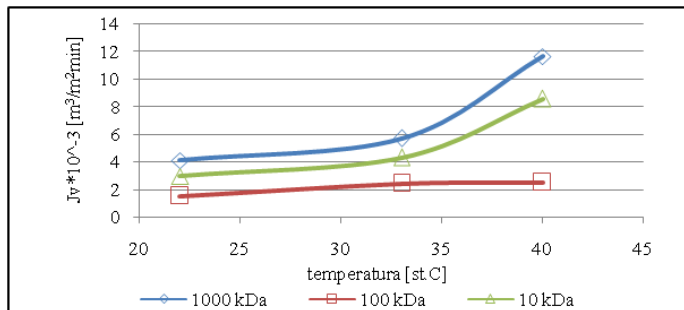


Rys. 4. Zależność strumienia permeatu od czasu dla trzech membran przy temperaturze 22°C nadawy (stałe TMP = 25 psi)

Rys. 5. Zależność strumienia permeatu od czasu dla trzech membran przy temperaturze 40°C nadawy (stałe TMP = 25 psi)

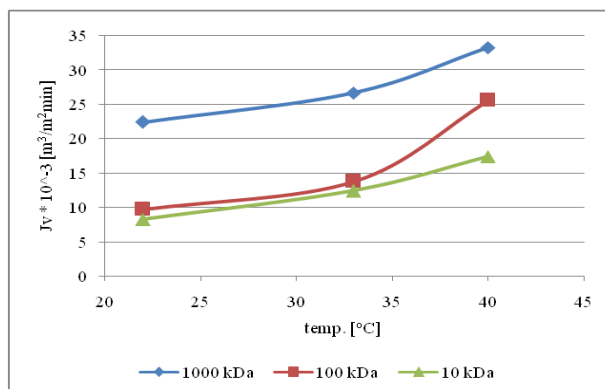
Zmierzony przepływ przy mikronażu 100 kDa odbiega od zakładanej zależności, gdyż był niższy niż dla membrany 10 kDa (rys. 6). Uzyskane wyniki tłumaczyć można silniejszym blokowaniem membrany 100 kDa niż membrany 10 kDa z powodu wielkości zanieczyszczeń znajdujących się w szarych ściekach. Przy przepływie krzyżowym zanieczyszczenia wnikają w mniejszym stopniu w pory membrany 10 kDa niż

w przypadku membrany 100 kDa. Poprawności przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników może dowodzić przepływ wody destylowanej przez przegrody filtracyjne. W przypadku wody destylowanej uzyskano natężenie przepływu proporcjonalne do mikronażu dla wszystkich temperatur (rys. 7). Dodatkowo w celu udowodnienia wpływu temperatury nadawy na wielkość strumienia permeatu wykonano doświadczenie, którego wyniki przedstawiono na rysunku 8.

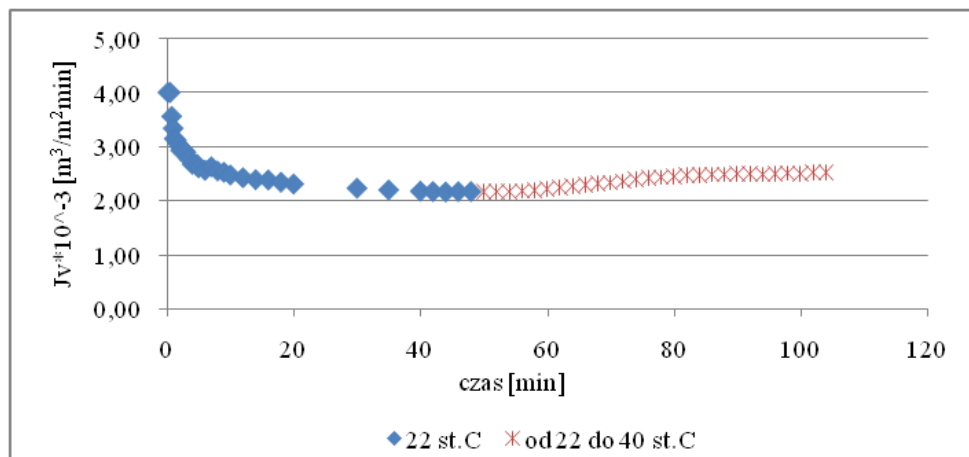


Rys. 6. Zależność strumienia permeatu od temperatury dla trzech membran przy czasie 50 minut

Polegało ono na prowadzeniu ultrafiltracji szarych ścieków o temp. 22°C przez membranę 10 kDa do momentu ustabilizowania się przepływu, a następnie stopniowym dynamicznym zwiększaniu temperatury nadawy z 22 do 40°C. Po czasie 40 min stwierdzono stabilizację strumienia na poziomie ok. 2,15 m³/m²min, natomiast wzrost temperatury nadawy spowodował zwiększenie natężenia przepływu do ok. 2,50 m³/m²min. Mimo, iż membrana uległa w początkowym etapie zablokowaniu, spadek oporów hydraulicznych i przypuszczalna zmiana w strukturze membrany spowodowane zwiększeniem temperatury, przyczyniły się do zwiększenia strumienia permeatu.



Rys. 7. Zmiana strumienia wody destylowanej w zależności od temperatury nadawy dla trzech membran o różnym mikronażu

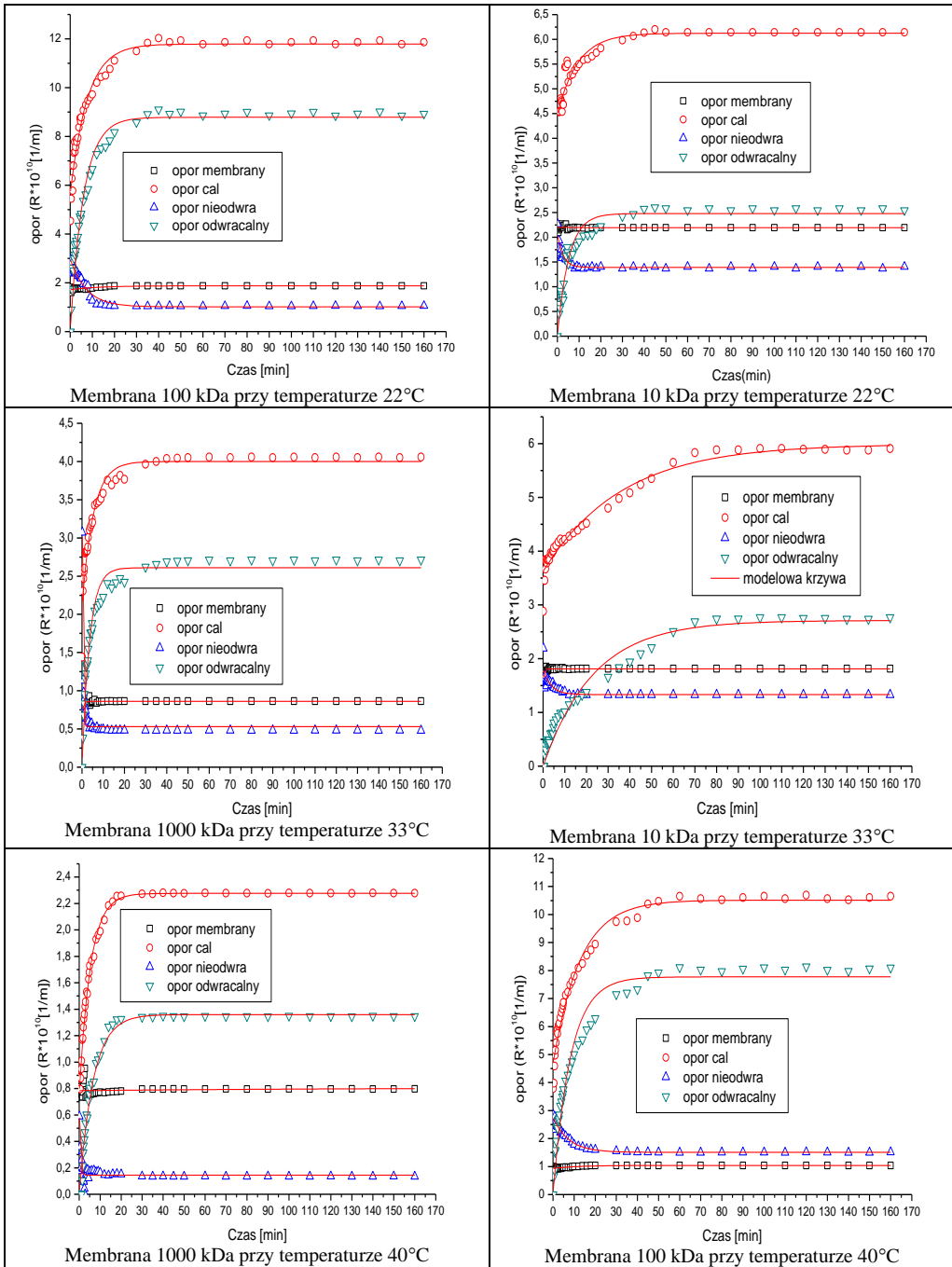


Rys. 8. Zmiana strumienia permeatu w czasie przy dynamicznie rosnącej temperaturze nadawy od 22 do 40°C po ustalonym przepływie przy 22°C dla membrany 10 kDa

Dokonując analizy wyznaczonych na podstawie modelu hydraulicznego poszczególnych oporów (rys. 9) stwierdzono, że największy udział w oporze całkowitym stanowił opór odwracalny. Wraz ze wzrostem temperatury nadawy zmniejszeniu ulegał opór membrany. Przykładowo dla membrany 100 kDa, opór wynosił przy temp. 22°C ok. $2 \cdot 10^{10}$ [1/m] natomiast przy temp. 40°C jedynie ok. $1,15 \cdot 10^{10}$ [1/m]. Przy wyższej temperaturze nadawy odnotowywano również mniejszy opór nieodwracalny. Zmierzone zmiany oporu hydraulicznego pod wpływem zmian temperatury tłumaczą wcześniej omawiane wyniki dotyczące zmiany natężenia przepływu.

Przeprowadzono dopasowanie modelu hydraulicznego do danych doświadczalnych i wyznaczono parametry równania (3), które zestawiono w tabeli 2.

Z prezentowanych parametrów modelu wynika, że przy najwyższej temperaturze dynamika blokowania membrany była najmniejsza. Dowodem tego są najwyższe wartości parametru t_{R0} co oznacza, że membrana blokuje się w dłuższym czasie a ustabilizowany opór odwracalny ma najniższą z uzyskanych wartości. Uzyskano wysoki stopień dopasowania modelu do danych doświadczalnych. Jedynie w przypadku membrany 10 kDa i temperatury 40°C odnotowano niski współczynnik dopasowania o wartości $R^2 = 0,72$. Może tłumaczyć to rozbieżność uzyskanych parametrów od wyżej opisanej zależności.



Rys. 9. Zmiana oporów w czasie dla membran 10, 100 i 1000 kDa przy temperaturze nadawy 22, 33 i 40°C

Tabela 2. Parametry modelu hydraulicznego dla trzech membran w zależności od temperatury

Temp. [°C]	10 kDa			100 kDa			1000 kDa		
	$R_{\infty} \cdot 10^{10}$ [1/m]	t_{R0} [1/min]	R^2	$R_{\infty} \cdot 10^{10}$ [1/m]	t_{R0} [1/min]	R^2	$R_{\infty} \cdot 10^{10}$ [1/m]	t_{R0} [1/min]	R^2
22	2,48 ± 0,04	5,16 ± 0,33	0,94	8,79 ± 0,10	5,98 ± 0,25	0,98	2,93 ± 0,04	1,98 ± 0,13	0,90
33	2,71 ± 0,06	23,2 ± 1,60	0,97	6,47 ± 0,08	12,29 ± 0,52	0,98	2,61 ± 0,03	3,62 ± 0,16	0,96
40	1,24 ± 0,04	3,66 ± 0,22	0,72	7,77 ± 0,12	8,31 ± 0,44	0,97	1,36 ± 0,02	6,64 ± 0,29	0,98

3.2. SKUTECZNOŚĆ OCZYSZCZANIA SZAREJ WODY

Temperatura nadawy miała również wpływ na skuteczność oczyszczania szarych ścieków. W prowadzonych badaniach zaobserwowano zwiększony stopień rozpuszczenia użytego proszku do prania przy wyższej temperaturze. Przekładać się to może na silniejsze wnikanie rozpuszczonych zanieczyszczeń w pory membrany i przenikanie przez przegrodę filtracyjną, ostatecznie prowadząc do pogorszenia jakości odzyskanej wody z ścieków szarych. Biorąc pod uwagę wstępne obserwacje i założenia przeprowadzono analizę wybranych parametrów jakościowych przed i po każdym z doświadczeń ultrafiltracji szarych ścieków.

W tabeli 3 przedstawiono parametry szarych ścieków po wstępnej filtracji przez sącze jakościowo-ilościowy. Zgodnie z założeniami w najwyższym stopniu uległy zatrzymaniu zanieczyszczenia powodujące mętność ścieków. Pozostałe parametry uległy nieznacznemu obniżeniu.

Tabela 3. Stopień usuwania zanieczyszczeń po wstępnej filtracji szarych ścieków

Szare ścieki		Surowe	Przefiltr. przez sącze
pH		10,6	10,3
ChZT _{Cr}	mgO ₂ /dm ³	3120	3000
Mętność	NTU	10	4,74
OWO	mg/dm ³	209,9	162,5
Przewodność	μS/cm	3800	3200
Detergenty anionowe	mg/dm ³	1345	1261
Detergenty niejonowe	mg/dm ³	0,04	0,038

Zabezpieczyło to przed nadmiernym blokowaniem membrany ultrafiltracyjnej, które pozwoliły ostatecznie na zatrzymanie zanieczyszczeń zgodnie z tabelą 4.

Tabela 4. Stopień zatrzymania zanieczyszczeń po ultrafiltracji szarych ścieków

Wskaźnik		Temperatura [°C]								
		Membrana [kDa]								
		20			33			40		
		1000	100	10	1000	100	10	1000	100	10
pH	-	9,6	9,61	9,65	9,7	9,56	9,65	9,74	9,61	9,75
	%	6,8	6,7	6,31	5,83	7,18	6,31	5,44	6,7	5,34
ChZT _{Cr}	mgO ₂ /dm ³	1840	560	240	2240	440	480	2400	1480	1080
	%	38,67	81,33	92	25,33	85,33	84	20	50,67	64
Mętność	NTU	0,62	0,1	0,1	0,66	0,18	0,13	0,68	0,18	0,13
	%	86,92	97,89	97,89	86,08	96,2	97,26	85,65	96,2	97,26
OWO	mg/dm ³	90,36	54,13	49,97	88,43	73,86	50,05	91,2	81,96	55,22
	%	44,39	66,69	69,25	45,58	54,55	69,2	43,88	49,56	66,02
Przewodność	μS/cm	2550	2370	2800	2500	2500	2500	2500	2600	2950
	%	20,31	25,94	12,5	21,88	21,88	21,88	21,88	18,75	7,81
Detergenty anionowe	mg/dm ³	328	337,5	371,6	575	396,5	383,1	652	425	361,8
	%	73,99	73,24	70,53	54,4	68,56	69,62	48,3	66,3	71,31
Detergenty niejonowe	mg/dm ³	0,02	0,002	0,001	0,028	0,003	0,002	0,029	0,003	0,003
	%	47,37	94,74	97,37	26,32	92,11	94,74	23,68	92,11	92,11

Z przeprowadzonej analizy fizyko-chemicznej odzyskanej wody wynika, że najwyższy stopień oczyszczenia uzyskano przy zastosowaniu membrany 10 kDa, a najniższy dla membrany 1000 kDa. Przykładowo detergenty anionowe zostały usunięte w 71,31% przy użyciu membrany 10 kDa natomiast tylko w 48,3% przy zastosowaniu membrany 1000 kDa. Prowadząc proces ultrafiltracji przy wyższej temperaturze nadawy odnotowano znaczne pogorszenie jakości odzyskanej wody, szczególnie dla membran 100 i 1000 kDa. Dla membrany 1000 kDa skuteczność zatrzymywania detergentów anionowych i niejonowych w odniesieniu temperatury 22°C do 40°C spadła prawie o połowę. Tłumaczyć można to wyższym stopniem rozpuszczenia składników proszku w wyższej temperaturze oraz zmianami struktury membrany.

4. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania dowodzą możliwości opisu procesu ultrafiltracji przy wykorzystaniu modelu hydraulicznego,
2. Model hydrauliczny pozwala na określenie dynamiki blokowania membrany i stopnia wnikanía zanieczyszczeń poprzez wielkość oporu odwracalnego,

3. Wpływ temperatury nadawy zauważalny był w przypadku strumienia roztworu oraz skuteczności oczyszczania szarych ścieków,
4. Przy temperaturze 40°C odnotowano zwiększone natężenie przepływu przez przegrodę filtracyjną przy jednoczesnej szybszej dynamice blokowania się membrany niż przy temperaturze 22°C,
5. Jakość odzyskanej wody pogarszała się przy wyższych temperaturach nadawy.

Badania wykonano w ramach realizacji Projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA

- [1] ERIKSSON E., AUFFARTH K., HENZE M., LEDIN A., *Characteristics of grey wastewater*, Urban Water, 2002, Vol. 4. 85–104.
- [2] GHISI, E., FERREIRA, D.F., *Potential for potable water savings by using rainwater and grey-water in a multi-storey residential building in southern Brazil*, Build. Environ., 2007, Vol. 42, 2512–2522.
- [3] JODŁOWSKI A., DOBRZAŃSKI M., *Zastosowanie filtrów narurowych i membran ultrafiltracyjnych do oczyszczania wody z prania*; Instal, 2014, No. 6, 71–75.
- [4] RAJCA M., BODZEK M., KONIECZNY K., *Application of mathematical models to the calculation of ultrafiltration flux in water treatment*, Desalination, 2009, Vol. 239, 100–110.
- [5] WILLIS R., STEWART R.A., GIURCO D.P., TALEBPOUR M.R., MOUSAVINEJAD A., *End use water consumption in households: impact of socio-demographic factors and efficient devices*, Journal of Cleaner Production, 2011, 1–9.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE GREY WATER TREATMENT IN THE LIGHT OF HYDRAULIC MODEL

The research aimed to determine the influence of feed temperature on the gray water treatment in the process of ultrafiltration. Hydraulic model was used to describe the process flow. The research realized using gray water imitating wastewater from washing, that were treated by ultrafiltration membranes 10, 100 and 1000 kDa. It was found a strong influence of temperature on the efficiency of feed greywater treatment and the size of the volume flow.