

**Fabian Dajnowiec<sup>1</sup>, Paweł Banaszczyk<sup>1</sup>, Lidia Zander<sup>1</sup>  
Maria Soral-Śmietana<sup>2</sup>, Małgorzata Wronkowska<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

<sup>2</sup> Instytut Rozrodu Zwierząt i Badań Żywności Polskiej Akademii Nauk w Olsztynie  
e-mail: Fabian.Dajnowiec@uwm.edu.pl

---

## **WYKORZYSTANIE MEMBRAN POLIAMIDOWYCH DO OTRZYMYWANIA KONCENTRATU SERWATKI KWASOWEJ\***

---

**Streszczenie:** W przedstawionym badaniu otrzymywano koncentraty serwatki kwasowej metodą nanofiltracji przy użyciu poliamidowych membran rurkowych, określono zmiany szybkości permeacji i zmiany zawartości wybranych pierwiastków. Każdy odrębny proces separacji przebiegał z różną szybkością, ale charakter zmian szybkości permeacji w czasie był zbliżony. W koncentracie zawartość składników suchej masy zwiększała się proporcjonalnie do współczynnika koncentracji  $CR$  – oprócz substancji mineralnych, takich jak makroelementy (Ca, Mg, P) i mikroelementy (Zn i Fe). Jednocześnie udział sodu i potasu ulegał obniżeniu. Oznacza to, że zastosowane membrany poliamidowe umożliwiają koncentrowanie składników suchej masy serwatki kwasowej przy jednoczesnej częściowej demineralizacji polegającej na obniżeniu zawartości jonów jednowartościowych.

**Słowa kluczowe:** serwatka kwasowa, nanofiltracja, rurkowe membrany poliamidowe, demineralizacja.

### **1. Wstęp**

Serwatka kwasowa – produkt uboczny przy produkcji twarogów zwykle traktowany jako kłopotliwy odpad – zawiera w swym składzie wiele cennych białek, witamin i minerałów [Onwulata, Huth 2008]. Z tego względu powinno się ją traktować jako surowiec do pozyskiwania tych wartościowych składników, co może prowadzić do poprawy efektywności produkcji w zakładach mleczarskich. Nowoczesne techniki rozdzielania cieczy pozwalają na otrzymywanie koncentratów i izolatów białek serwatkowych, preparatów laktozowych będących surowcem do produkcji laktozy. Wyodrębnione z serwatki składniki znajdują zastosowanie jako dodatki do żywności, zwiększając wartości odżywcze i prozdrowotne produktów spożywczych [Davis, Foegeding 2007; Yada 2004]. Składniki serwatki znajdują również zastosowanie

---

\* Badania były współfinansowane z projektu rozwojowego N R12 0086 06/2009 z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

w przemyśle farmaceutycznym. Laktoza jest popularnym wypełniaczem tabletek, a białka serwatkowe wykorzystuje się jako materiał matrycy w procesach mikrokapsułkowania leków [Lee, Rosenberg 2000].

Istotnym problemem związanym z otrzymywaniem białkowych składników z serwatki kwasowej jest wysoka zawartość wody w surowcu i stosunkowo wysoka zawartość związków mineralnych oraz kwasu mlekowego w suchej masie [Ha, Zemel 2003; Smithers 2008]. Obecnie coraz bardziej popularne techniki membranowe pozwalają nie tylko na usuwanie większości wody z serwatki, ale i na selektywne wydzielanie z serwatki związków mineralnych, białek i laktozy. W porównaniu z tradycyjnymi termicznymi technikami koncentracji składników suchej masy serwatki zaletą separacji membranowej są łagodne warunki termiczne prowadzenia procesu i brak przemian fazowych podczas usuwania nadmiaru wody, a więc i mniejszy nakład energii niezbędnej do przeprowadzenia rozdziału [Cheryan, Kup 1984].

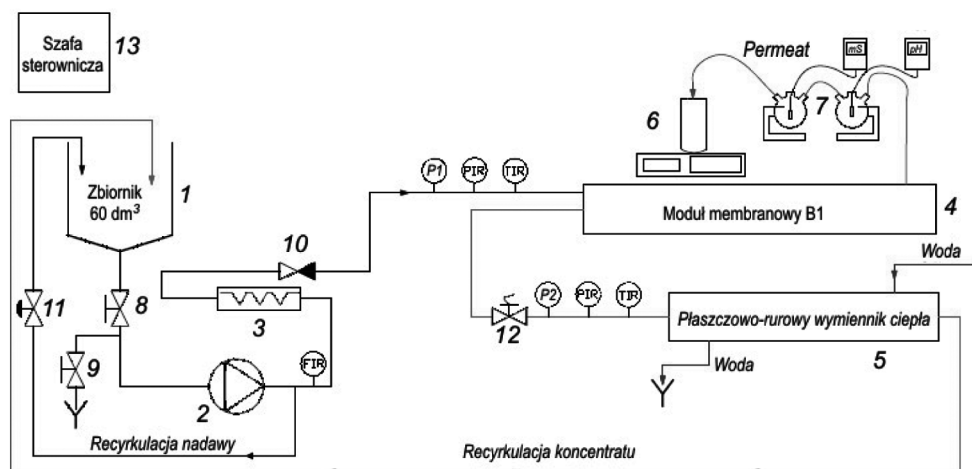
W procesach przetwórczych serwatki znajdują zastosowanie takie membranowe techniki separacji, jak: ultrafiltracja, nanofiltracja oraz odwrócona osmoza. Wśród wymienionych membranowych procesów rozdziału szczególnie interesujące wyniki może dać nanofiltracja, umożliwiająca zmniejszenie zawartości substancji mineralnych w koncentracie i częściowe usuwanie kwasu mlekowego dzięki zdolności selektywnej permeacji jonów jednowartościowych i związków organicznych o małej masie molekularnej [Chandan 2008].

W przemyśle wykorzystuje się membrany nanofiltracyjne wykonane z różnych materiałów. Do ich produkcji stosuje się: polifluorekwinylidenu (PVDF), polieterosulfon (PES), polisulfon (PS) lub inne polimery. Warstwy selektywne membran nanofiltracyjnych są wykonywane również z poliamidu. Membrany wykonane z różnych polimerów charakteryzuje zróżnicowanie przepuszczalności określonych składników serwatki [Li i in. 2008; Narębska 1997]. W praktyce buduje się membrany o różnej konstrukcji modułów. Najczęściej stosowane są moduły spiralnie zwijane i płaskie – płytowe [Chandan 2008; Cheryan, Kup 1984]. W przemyśle mleczarskim najmniej popularne są membrany rurkowe.

Celem niniejszej pracy było przedstawienie zastosowania procesu nanofiltracji do otrzymania koncentratów składników suchej masy serwatki kwasowej, określenie zmian szybkości permeacji i ocena zmian zawartości wybranych pierwiastków w wyniku procesu rozdziału prowadzonego przy wykorzystaniu rurkowych membran poliamidowych.

## 2. Materiał i metody badawcze

Serwatkę kwasową pozyskiwano bezpośrednio po produkcji twarogu metodą tradycyjną w przemysłowym zakładzie przetwórstwa mleka. Natychmiast po odczerpaniu serwatki schładzano do temperatury poniżej 10°C i po przewiezieniu do laboratorium poddawano procesowi nanofiltracji. Łącznie przeprowadzono trzy eksperymenty, poddając separacji 354 kg surowca. Separację prowadzono w trybie okresowym z wykorzystaniem pilotowej stacji membranowej przedstawionej na rysunku 1.



Objaśnienia: 1 – zbiornik zasilający, 2 – pompa, 3 – filtr szczelinowy, 4 – moduł membranowy typu B1, 5 – wymiennik ciepła, 6 – waga ze zbiornikiem do odbioru permeatu, 7 – zespół kolb pomiarowych, 8, 9 – zawory odcinające, 10 – zawór zwrotny, 11 – zawór regulacyjny, 12 – zawór stałego ciśnienia; 13 – szafa sterownicza PI – manometr, PIR – pomiar i rejestracja ciśnienia, TIR – pomiar i rejestracja temperatury.

**Rys. 1.** Schemat instalacji membranowej do separacji składników serwatki

Źródło: opracowanie własne

Głównym elementem instalacji jest moduł membranowy (typu B1) o średnicy zewnętrznej  $\varnothing 100$  mm, zawierający 18 wymiennych, połączonych szeregowo, rurkowych membran polimerowych o średnicy wewnętrznej 12,5 mm i łącznej powierzchni filtracyjnej 0,86 m<sup>2</sup>. W doświadczeniach stosowano membrany poliamidowe typu AFC 30 (Xylem PCI Membranes) o nominalnym współczynniku retencji 75% CaCl<sub>2</sub>.

Instalacja była wyposażona w wysokociśnieniową pompę typu CRE firmy Grundfos, zawór regulujący ciśnienie transmembranowe oraz przetworniki ciśnienia i temperatury. Podczas procesu separacji w odstępach 1-minutowych rejestrowano elektronicznie przyrost masy permeatu. W odstępach 30-minutowych notowano zmiany kwasowości czynnej pH (pH-metr Elemetron CP- 505 z elektrodą zespoloną) i przewodności elektrycznej  $\kappa$  permeatu (konduktometr Hanna HI 8733).

W celu dokonania analizy przebiegu procesu nanofiltracji w oparciu o zebrane dane procesowe obliczano następujące wielkości:

- ciśnienie transmembranowe  $\Delta P_{TM}$

$$\Delta P_{TM} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2), \quad (1)$$

- szybkość permeacji  $J_v$

$$J_v = \frac{J(t)}{A}, \quad (2)$$

- współczynnik koncentracji  $CR$

$$CR = \frac{M_s}{M_K}. \quad (3)$$

Chwilowe wartości strumienia  $J(t)$  obliczano metodą numerycznego różniczkowania kumulacyjnych krzywych narastania masy permeatu w czasie procesu [Wołkowiak i in. 2009].

Analizy na zawartość tłuszczu w serwatce przeznaczonej do przerobu oznaczaną metodą Gerbera, a kwasowość czynną (pH) wykonywano w laboratorium przemysłowym producenta. W serwatce kwasowej oraz koncentracie oznaczano zawartość: suchej masy metodą suszarkową, składników mineralnych ogółem (tzw. popiół) [PN-A-86364:1996], białka ogółem metodą Kjeldahla [*Official Methods...* 2011], laktozy metodą enzymatyczną (Lactose/D-Glucose reagent, nr kat. 10986119035, R-BIOPHARM, Germany). Metodą spektrometrii absorpcji atomowej (AAS), po mineralizacji na mokro, w serwatce i otrzymanym z niej koncentracie oznaczano koncentrację następujących pierwiastków: wapń, sód, potas, fosfor, magnez, cynk i żelazo.

### 3. Wyniki

Poddawana procesowi nanofiltracji serwatka kwasowa charakteryzowała się właściwościami typowymi dla tego surowca. Jej średni skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1. Zawartości poszczególnych składników i wzajemne relacje między nimi były zgodne z danymi innych autorów [Román i in. 2009]. Rozbieżności w składzie poszczególnych składników serwatki mogą wynikać z tradycyjnej technologii i techniki produkcji twarogów w zakładzie przetwórczym.

**Tabela 1.** Średni skład chemiczny kwasowej serwatki przed i po procesie nanofiltracji

Składnik/parametr	Jednostka	Serwatka	Koncentrat
Sucha masa	% mas.	5,53 ± 0,30	21,00 ± 0,40
Białko (azot ogółem × 6,38)	% mas.	0,75 ± 0,02	1,96 ± 0,95
Laktoza	% mas.	3,98 ± 0,09	17,55 ± 1,80
Tłuszcz	% mas.	0,05 ± 0,02	0,13 ± 0,03
Popiół	% mas.	0,76 ± 0,05	1,36 ± 0,11
Kwasowość czynna	pH	4,56 ± 0,03	4,62 ± 0,03

Źródło: opracowanie własne.

Średnie wartości charakteryzujące warunki prowadzenia procesów w poszczególnych doświadczeniach podano w tabeli 2.

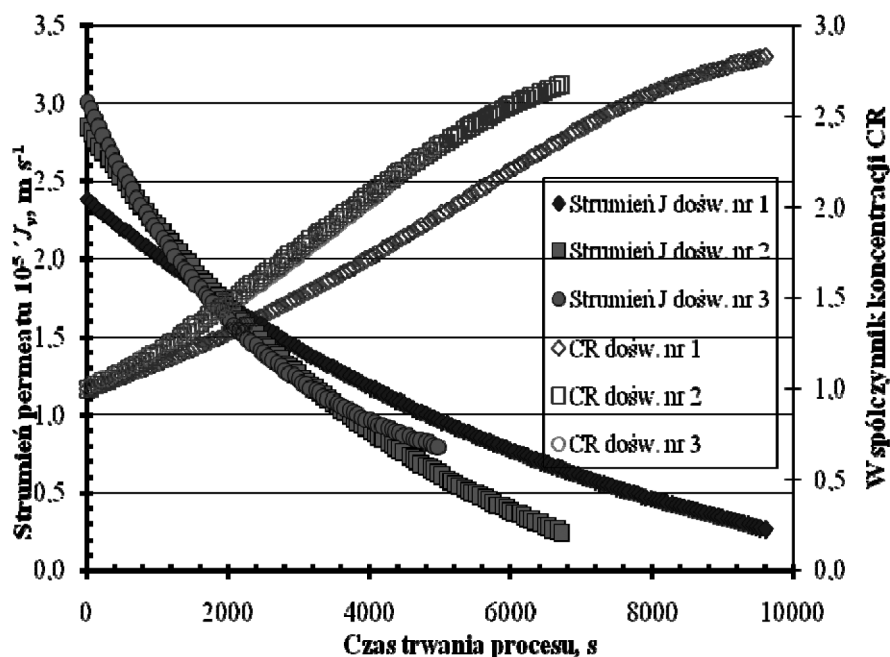
**Tabela 2.** Średnie parametry surowca i warunków pracy stacji nanofiltrycyjnej

Wielkość		Wartości średnie dla doświadczenia nr		
		1	2	3
Masa surowca, kg		134	110	110
Współczynnik koncentracji końcowy $CR$		2,828	2,672	2,340
Czas trwania procesu, min		160	112	83
Zawartość suchej masy, kg	początkowa	5,52	5,46	5,60
	końcowa	21,37	20,12	21,52
Kwasowość pH	surowiec	4,58	4,52	4,57
	permeat	4,44	4,45	4,43
Przewodność elektryczna mS	surowiec	81,8	67,3	90,2
	koncentrat	58,0	60,2	55,0
Wydajność zasilania stacji, $\text{dm}^3 \text{s}^{-1}$		0,49	0,49	0,50
Ciśnienie transmembranowe, MPa		2,17	2,21	2,36
Początkowy strumień permeatu, $10^5 J_0, \text{m s}^{-1}$		2,384	2,849	3,012
Średnia szybkość permeacji, $10^5 J, \text{m s}^{-1}$		1,067	1,214	1,557

Źródło: opracowanie własne.

Podczas doświadczeń instalacja procesowa pracowała w trybie okresowym przy zasilaniu surowcem z wydajnością  $0,49 \cdot 10^{-3} \div 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , co odpowiada prędkości przepływu  $3,6 \div 4,4 \text{ m s}^{-1}$ . Ciśnienie cieczy na dopływie do jednostki membranowej wynosiło  $1,7 \div 2,6 \text{ MPa}$ . Parametry pracy stacji nanofiltracji ilustruje tabela 2. Podczas trwania procesu nanofiltracji serwatki kwasowej następował charakterystyczny w instalacjach membranowych spadek szybkości nanofiltracji  $J_v$ . Zmiany szybkości procesu  $J_v$  i współczynnika koncentracji  $CR$  ilustruje rysunek 2.

Wynika stąd, że każdy eksperyment przebiegał nieco odmiennie, mimo że warunki prowadzenia procesów były zbliżone. Krzywe  $J_v = f(t)$  i  $CR = f(t)$ , opisujące przebieg eksperymentów nr 2 i 3, przez 50 pierwszych minut niemal pokrywały się, jednak w dalszej fazie procesu szybkość permeacji obu partii serwatki była wyraźnie różna, co w konsekwencji doprowadziło do różnic czasu trwania całej operacji i końcowego stopnia zateżenia  $CR$  (tab. 2). W doświadczeniu nr 2, w którym separację prowadzono przy minimalnie mniejszym ciśnieniu, początkowy strumień permeatu był wyraźnie mniejszy, ale także szybkość zmniejszania się strumienia permeatu była mniejsza. Po 22-24 minutach procesu wartości  $J(t)$  we wszystkich eksperymentach zrównały się, po czym wielkości  $J(t)$  dla doświadczenia 2 utrzymywały się już na wyższym poziomie niż w pozostałych eksperymentach. W konsekwencji proces można było prowadzić dłużej, uzyskując wyższy stopień koncentracji  $CR$ .



Rys. 2. Zmiany szybkości permeacji  $J_v$  i współczynnika koncentracji  $CR$  podczas procesów nanofiltracji serwatki kwasowej

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z zasadą prowadzenia procesu okresowego, w miarę odpływu permeatu z biegiem czasu następował wzrost współczynnika koncentracji  $CR$  przy jednoczesnym zmniejszaniu się szybkości permeacji. Zwłaszcza w pierwszej fazie procesu szybkość permeacji malała w dużym tempie, gdyż następowała polaryzacja membrany i formowanie się warstwy przymembranowej. Typowy w procesach separacji membranowej spadek strumienia permeatu podczas procesu był wielokrotnie zauważany zarówno w pracach eksperymentalnych [Konrad i in. 2012; Rao 2002], jak i opracowaniach teoretycznych w postaci modeli matematycznych [Kanani, Ghosh 2007; Yee i in. 2009].

Spadek ten ma związek nie tylko ze zjawiskiem polaryzacji stężeniowej, lecz także z adsorpcją białek na powierzchni membrany [Brink, Romijn 1990; Taddei i in. 1989]. Rozróżnienie mechanizmów przyczyniających się do zmniejszania strumienia permeatu w czasie na podstawie zebranego materiału nie jest jednak możliwe. Również postępujące w procesie zwiększanie się koncentracji składników suchej masy serwatki w strumieniu zasilającym membranę zdecydowanie zwiększa opory przepływu permeatu. Badania, które przeprowadzili Román i in., [2009], stosując płaskie poliamidowo-mocznikowe membrany nanofiltracyjne i zbliżony poziom ciśnienia transmembranowego (20 MPa), wykazywały podobny przebieg zmian szybkości

permeacji podczas nanofiltracji serwatki kwasowej. Początkowy strumień permeatu  $J_0$  w cytowanej pracy wynosił 50-58 L/m<sup>2</sup>h, czyli  $(1,4 \div 1,6) \times 10^{-5}$  m/s, i podczas procesu ulegał on zmniejszeniu do około 3 L/m<sup>2</sup>h ( $8,3 \times 10^{-7}$  m/s) przy współczynniku koncentracji  $CR \approx 3,5$ . W prezentowanych eksperymentach na początku procesu obserwowano strumień  $J_0$  równy  $(2,4 \div 3,1) \times 10^{-5}$  m/s, po czym następował spadek  $J_0$  do  $0,3 \times 10^{-5}$  m/s po osiągnięciu współczynnika koncentracji  $CR = 2,8$ . Tak więc otrzymane wielkości strumienia są porównywalne z danymi dostępnymi w literaturze. Również w przypadku zastosowania poliamidowych membran spiralnie zwijanych do nanofiltracji serwatki w pracy [Pan i in. 2011] stwierdzano spadek szybkości permeacji od  $0,7 \times 10^{-5}$  do  $0,5 \times 10^{-5}$  m/s. Wynika stąd, że membrany rurkowe pozwalają na prowadzenie procesu nanofiltracji serwatki kwasowej z wydajnością porównywalną do osiąganą w instalacjach o innej konstrukcji modułów membranowych.

Charakterystyczną cechą membran nanofiltracyjnych stosowanych w mleczarstwie jest stosunkowo wysoka zdolność permeacji jonów jednowartościowych i retencja jonów dwuwartościowych oraz pozostałych wielkocząsteczkowych składników surowca [Alkhatim i in. 1998; Jeantet i in. 2000]. Podobną prawidłowość zaobserwowano również podczas przeprowadzonych procesów nanofiltracji serwatki kwasowej z zastosowaniem membran poliamidowych. W tabeli 3 przedstawiono zawartość wybranych pierwiastków w poddawanej separacji serwatce kwasowej i uzyskanym koncentracie nanofiltracyjnym.

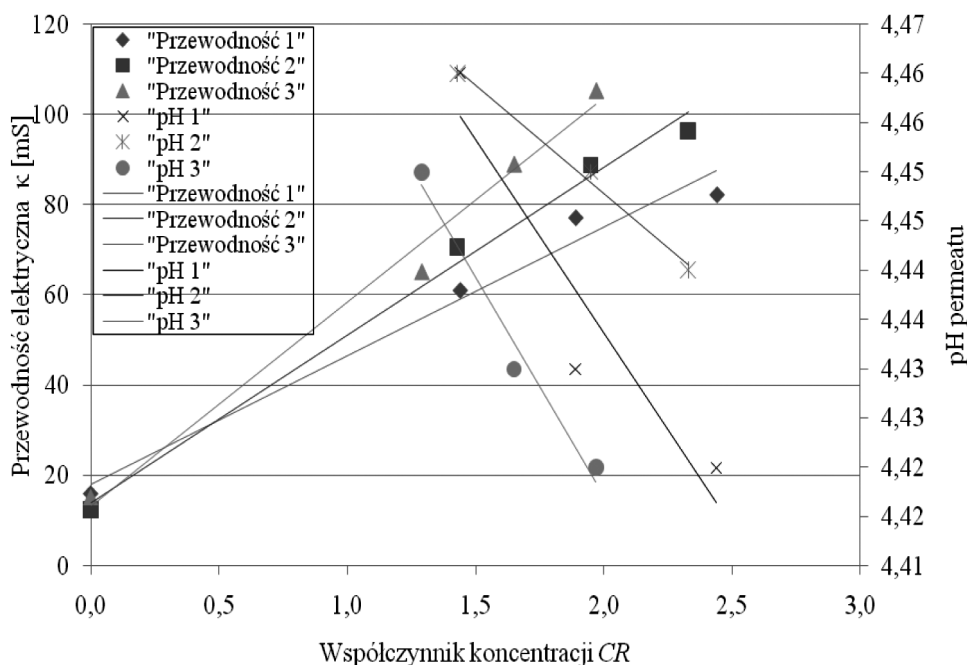
**Tabela 3.** Średni skład związków mineralnych serwatki przed i po procesie nanofiltracji

Produkt	Zawartość pierwiastka						
	[mg/g produktu]					[μg/g produktu]	
	wapń	sód	potas	fosfor	magnez	cynk	żelazo
Serwatka kwasowa	1,23 ±0,06	0,42 ±0,10	1,49 ±0,16	0,69 ±0,04	0,11 ±0,04	3,14 ±0,26	0,18 ±0,03
Koncentrat	2,85 ±0,18	0,45 ±0,06	1,67 ±0,14	1,71 ±0,19	0,32 ±0,02	9,44 ±0,45	0,93 ±0,15
	Średni stopień skoncetrowania pierwiastka po nanofiltracji w stosunku do jego zawartości w serwatce						
	2,32	1,07	1,12	2,48	2,90	3,0	5,17

Źródło: opracowanie własne.

Najmniejszy stopień koncentracji pierwiastków stwierdzono w przypadku jonów sodu i potasu, co było zgodne z oczekiwaniami i celami przeprowadzonych eksperymentów i świadczyło o migracji tych jonów przez membrany. Otrzymane w wyniku doświadczeń koncentraty charakteryzował zdecydowanie większy udział pierwiastków wielowartościowych, w stosunku do ogólnej ilości związków mineralnych w porównaniu z proporcjami występującymi w surowcu.

Stopień migracji jonów przez membranę nanofiltracyjną zmieniał się podczas procesu, o czym świadczyły zmiany przewodności elektrycznej i pH permeatu. Z upływem czasu i wzrostem stopnia zagęszczenia zwiększało się stężenie składników suchej masy w strumieniu serwatki zasilającej membranę. Wzrost wartości przewodności elektrycznej  $\kappa$  permeatu ze wzrostem współczynnika koncentracji  $CR$ , zilustrowany na rysunku 3, wskazuje na to, że ilość składników przechodzących przez membranę do permeatu była uzależniona nie tylko od nominalnej zdolności rozdzielczej membrany, lecz od ich stężenia w strumieniu zasilającym membranę. Ma to związek ze zwiększaniem się efektywnego promienia porów membran nanofiltracyjnych ze wzrostem siły jonowej rozdzielanego roztworu [Yacubowicz, Yacubowicz 2005].



**Rys. 3.** Zmiany przewodności elektrycznej  $\kappa$  i pH permeatu podczas procesu nanofiltracji serwatki kwasowej

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki są zbliżone z wynikami badań procesu nanofiltracji serwatki przedstawionymi w publikacji Pan i in. [2011]. Cytowani autorzy w procesie nanofiltracji z diafiltracją zdołali usunąć z serwatki 72% składników mineralnych, przy czym zaobserwowali również stopniowy wzrost przewodności elektrycznej permeatu ze wzrostem stężenia składników koncentracji.



Zróznicowanie przewodności elektrycznej serwatki poddawanej rozdzielaniu w niniejszej pracy (tab. 2), mające związek z różną siłą jonową, może również być przyczyną różnych szybkości permeacji w poszczególnych eksperymentach (rys. 2).

## 4. Wnioski

1. Szybkość permeacji i skuteczność rozdziału kwasowej serwatki w procesie nanofiltracji przy użyciu rurkowych membran poliamidowych są porównywalne z wynikami uzyskiwanymi w innych ośrodkach, w których badano separację podobnych surowców metodą nanofiltracji z wykorzystaniem membran poliamidowych spiralnie zwijanych i poli-amidowo-mocznikowych membran płytowych.

2. Prowadzenie procesów rozdziału składników suchej masy serwatki kwasowej wymaga ścisłej kontroli pH, ponieważ zdolność retencji składników mineralnych przez membranę zależy od siły jonowej rozdzielanego roztworu.

3. Wykorzystane w doświadczeniach rurkowe membrany poliamidowe mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w procesach zagęszczania składników suchej masy i częściowej demineralizacji serwatki kwasowej.

### Oznaczenia

- A – powierzchnia membrany,  $m^2$  ( $A = 0,86 m^2$ )  
 $J_0$  – jednostkowy strumień objętości permeatu na początku procesu,  $m s^{-1}$   
 $J_v$  – szybkość permeacji (strumień objętości permeatu odniesiony do  $1 m^2$  powierzchni membrany),  $m s^{-1}$   
 $J(t)$  – chwilowa wartość strumienia objętości permeatu,  $m^3 s^{-1}$   
 $M_S$  – masa surowca przed procesem, kg  
 $M_K$  – masa koncentratu, kg  
 $P_1$  – ciśnienie strumienia zasilającego przed modulem membranowym, Pa  
 $P_2$  – ciśnienie koncentratu za modulem membranowym, Pa  
 $\Delta P_{TM}$  – ciśnienie transmembranowe, Pa  
 $t$  – czas trwania procesu, s

### Literatura

- Alkhatim H.S., Alcaín M.I., Soriano E., Iborra M.I., Lora J., Arnal J., *Treatment of whey effluents from dairy industries by nanofiltration membranes*, Desalination 1998, 119, s. 177-184.  
Brink L.E.S., Romijn D.J. *Reducing the protein fouling of polysulfone surfaces and polysulfone ultrafiltration membranes: Optimization of the type of presorbed layer*, Desalination 1990, 78, s. 209-233.  
Chandan R.C., *Dairy Processing & Quality Assurance*, John Wiley & Sons, New York 2008.

- Cheryan M., Kup K.P. *Hollow fibers and spiral wound modules for ultrafiltration of whey: energy consumption and performance*, Journal Dairy Science 1984, 67, 7, s. 1406-1413.
- Davis J.P., Foegeding E.A., *Comparisons of the foaming and interfacial properties of whey protein isolate and egg white proteins*, Colloids and Surfaces B, Biointerfaces 2007, 54, 2, s. 200-210.
- Ha E., Zemel M.B., *Functional properties of whey, whey components, and essential amino acids: mechanisms underlying health benefits for active people (review)*, Journal of Nutritional Biochemistry 2003, 14, s. 251-258.
- Jeantet R., Rodriguez J., Garem A., *Nanofiltration of sweet whey by spiral wound organic membranes: Impact of hydrodynamics*, Lait 2000, 80, s. 155-163.
- Kanani D.M., Ghosh R., *A constant flux based mathematical model for predicting permeate flux decline in constant pressure protein ultrafiltration*, Journal of Membrane Science 2007, 290, s. 207-215.
- Konrad G., Kleinschmidt T., Faber W. *Ultrafiltration flux of acid whey obtained by lactic acid fermentation*, International Dairy Journal 2012, 22, s. 73-77.
- Lee S.J., Rosenberg M., *Microencapsulation of theophylline in whey proteins: effects of core-to-wall ratio*, International Journal of Pharmaceutics 2000, 205, s. 147-158.
- Li N., Fane A., Ho G., Winston W.S., Matsuura T., *Advanced Membrane Technology and Applications*, Blackwell Publishing 2008.
- Narębska A., *Membrany i membranowe techniki rozdzielu*, Wydawnictwo UMK, Toruń 1997.
- Official Methods of Analysis of AOAC International*, AOAC, 18th ed. Gaithersburg, Maryland 2011, USA, Kieldahl Methods: 991.20 (Nitrogen, total, in milk).
- Onwulata Ch., Huth P.J., *Whey Processing, Functionality and Health Benefits*, Blackwell Publishing 2008.
- Pan K., Song Q., Wang L., Cao B., *A study of demineralization of whey by nanofiltration membrane*, Desalination 2011, 267, s. 217-221.
- PN-A-86364:1996. *Mleko i przetwory mleczne. Serwatka. Metody badań*.
- Rao H.G.R., *Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk*, Desalination 2002, 144, s. 319-324.
- Román A., Wang J., Csanádi J., Hodúr G., Vatai G., *Partial demineralization and concentration of acid whey by nanofiltration combined with diafiltration*, Desalination 2009, 241, s. 288-295.
- Smithers G.W., *Whey and whey proteins. From 'gutter-to-gold'*, International Dairy Journal 2008, 18, s. 695-704.
- Taddei C., Daufin G., Aimar P., Sanchez V., *Role of some whey components on mass transfer in ultrafiltration*, Biotechnology and Bioengineering 1989, 34, 2, s. 171-179.
- Wołkowiak J., Zander L., Dajnowiec F., *Zastosowanie różniczkowania numerycznego z jednoczesnym wygładzaniem w obliczeniach strumienia permeatu podczas mikrofiltracji*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2009, 40, 1, s. 74-75.
- Yacubowicz H., Yacubowicz J., *Nanofiltration: properties and uses*, Filtration and Separation 2005, 9, s. 16-21.
- Yada R.Y., *Proteins in Food Processing*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition 2004.
- Yee K.W.K., Wiley D.E., Bao J., *A unified model of the time dependence of flux decline for long-term ultrafiltration of whey*, Journal of Membrane Science 2009, 332, s. 69-80.

## **APPLICATION OF POLYAMIDE MEMBRANES TO PRODUCE ACID WHEY CONCENTRATE**

**Summary:** The objective of the study was to produce acid whey concentrates using polyamide tubular membranes. The permeate flux variability and changes in selected elements contents were assessed. Each particular separation was characterized by slightly different permeation rate, but flux decline profiles were similar. In the retentate the compounds of whey dry matter have been concentrated by the factor of concentration ratio except for mineral compounds. The macro- (Ca, Mg, P) and micro elements (Zn, Fe) have been rejected by the membrane and retained in concentrate, meanwhile sodium and potassium contents were reduced. The results obtained indicate that polyamide membranes enable concentration of acid whey dry matter compounds simultaneously with partial demineralization of solutes based on removal of monovalent ions contents with permeate.

**Keywords:** acidic whey, nanofiltration, polyamide tubular membrane, demineralization.