

DARKO M. KRSTIĆ¹
RADMILA N. RAĐENović²
MARIJANA Đ. CARIĆ¹
SPASENIJA D. MILANOVIĆ¹
MIODRAG N. TEKIĆ¹

¹Tehnološki fakultet, Novi Sad
²"Nectar", d.o.o., Bačka Palanka

NAUČNI RAD

66.097.6+66.067.1+534.12:637.147

UTICAJ PROMOTORA TURBULENCIJE NA PRLJANJE MEMBRANE TOKOM UNAKRSNE MIKROFILTRACIJE

Primena mikrofiltracije u industriji je još uvek ograničena usled prljanja membrane koje dovodi do opadanja fluksa filtrata sa vremenom odvijanja procesa. Kao jedan od načina za povećanje fluksa kroz membranu ispitivana je upotreba statičkih promotora turbulencije različitih oblika. U ovom radu je izvršeno ispitivanje uticaja promotora turbulencije na prljanje membrane tokom unakrsne mikrofiltracije obranog mleka.

Eksperimentalna ispitivanja su obavljena na cevastim keramičkim kompozitnim membranama sa porama srednjeg prečnika 50 nm, 100 nm i 200 nm pri različitim operativnim uslovima. Rezultati su pokazali da primena promotora turbulencije dovodi do značajnog povećanja fluksa filtrata i smanjenja otpora usled prljanja kod svih ispitivanih membrana (povećanje fluksa oko 6 puta kod membrana sa porama od 100 i 200 nm). Glavni doprinos promotora turbulencije smanjenju ukupnog prljanja membrane predstavlja smanjenje površinskog prljanja, kao i smanjenje efekta koncentracione polarizacije. Rezultati su takođe pokazali da sa povećanjem veličine pora membrana raste uticaj unutrašnjeg prljanja.

Jedan od kritičnih faktora koji utiče na efikasnost unakrsne mikrofiltracije je prljanje membrane, koje smanjuje fluks filtrata i menja selektivne karakteristike membrane. U cilju povećanja fluksa kroz membranu upotrebljavani su statički promotori turbulencije različitih oblika tokom unakrsne mikrofiltracije i ultrafiltracije: namotane žice, fiksirane šipke sa i bez pregrada, metalne rešetke, umetci u obliku diska i prstena, statički mešači i umetci konusnog oblika [1–5]. Poyen i sar. [1] su tokom ultrafiltracije rastvora ulja u heptanu kao promotor koristili metalna sita dobijena bušenjem metalnih ploča. Dobljeni rezultati su pokazali povećanje koeficijenta prenosa mase od 2.7 puta. Finnigan i Howell [2] su unutar cevaste membrane naizmenično postavljali pregrade u obliku prstena i diskova. Tokom unakrsne ultrafiltracije 10–25 g/dm³ rastvora prečišćenog proteina surutke, filtracione karakteristike membrane su bile poboljšane oko 2.5 puta u slučaju upotrebe pregrada. Gupta i sar. [4] su ispitivali uticaj promotora turbulencije tokom mikrofiltracije 5% suspenzije pekarskog kvasca. Kao promotore su koristili fiksiranu šipku i helikoidnu pregradu smeštene u mineralnu cevastu membranu. Prilikom izvođenja procesa pri sličnim protocima primetili su povećanje fluksa za više od 100% sa helikoidnom pregradom, odnosno oko 15% sa šipkom kao pregradom. Wang i sar. [5] su pokazali da su centralno smeštene pregrade mnogo efikasnije kao promotori turbulencije u odnosu na pregrade koje se smeštaju blizu površine membrane. Treba naglasiti da je većina eksperimentalnih ispitivanja pregrada i umetaka kao promotora turbulencije dobijena tokom reversne osmoze i ultrafiltracije korišćenjem polimernih membrana, i u slučaju cevastih membrana sa unutrašnjim prečnicima većim od 10 mm.

Osim umetaka i pregrada, kao promotori turbulencije su ispitivani i statički mešači, naročito Kenics statički mešač [6–8]. On se sastoji od helikoidnih elemenata, koji zbog svog geometrijskog oblika i međusobnog rasporeda dovode do jedinstvene raspodele toka fluida sa istovremenim radijalnim mešanjem. Pitera i Middleman [6] su dobili značajno povećanje fluksa čiste vode kroz cevaste desalinacione membrane upotrebom Kenics statičkog mešača kao promotora turbulencije; čak i za Re broj oko 100, koncentracija soli na površini membrane je smanjena za 33% uz odgovarajuće poboljšanje kvaliteta permeata. Copas i Middleman [7] su koristili Kenics statički mešač prilikom ultrafiltracije emulzije lateksa. U celom opsegu ispitivanih protoka (Re od 2000 do 40000), primećen je pozitivan uticaj mešača na fluks permeata. Najveće povećanje (4.5 puta) je bilo za Re = 10000, dok je pri ostalim protocima povećanje fluksa bilo oko 2 puta. Vatai i Tekić [8] su ispitivali uticaj Kenics statičkog mešača na ultrafiltraciju natrijum karboksimetilceluloze i pektina. Za ispitivani opseg protoka primetili su da upotrebom mešača dolazi do smanjenja koncentracije u sloju gela na membrani, što je dovelo do povećanja fluksa više od 4 puta.

S obzirom na veliku primenu nekih membranskih procesa u industriji prerade mleka, u publikovanoj literaturi se može naći veliki broj radova posvećenih istraživanju unakrsne mikrofiltracije mleka [9–13]. Međutim, komercijalna primena ovog procesa je još uvek ograničena. Glavni razlog predstavlja slabo razumevanje fenomena koji dovode do prljanja membrane i načina za njihovu kontrolu. Prljanje membrane kod mikrofiltracije je složeno; do adsorpcije i taloženja proteina dolazi i na površini membrane i unutar pora.

U ovom radu je ispitan uticaj promotora turbulencije na prljanje membrane tokom unakrsne mikrofiltracije obranog mleka. Ispitivanja su obavljena u cilju povećanja fluksa filtrata, ali i potpunijeg razumevanja fenomena prljanja membrane. U tom smislu ispitane su različite membrane pri različitim operativnim uslovima.

Adresa autora: D. Krstić, Tehnološki fakultet, Bulevar Cara Lazara 1, 21000 Novi Sad
Rad primljen: Juli 28, 2000.
Rad prihvaćen: Decembar 21, 2000.

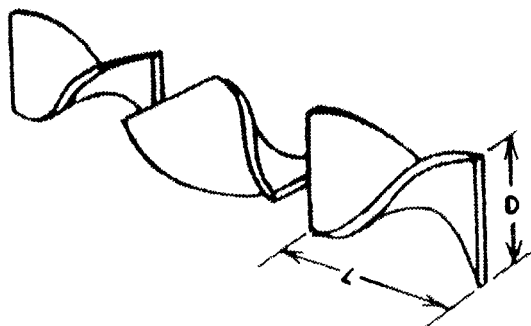
EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalna ispitivanja su obavljena na kompozitnim keramičkim Membralox™ membranama. Jedina razlika između njih je bila u materijalu aktivnog sloja i u veličini srednjeg prečnika pora membrane. Osnovne karakteristike korišćenih membrana su prikazane u Tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike ispitivanih membrana
Table 1. Characteristics of examined membranes

Proizvođač	SCT, Francuska		
Tip membrane	Kompozitna keramička cev		
Nosač membrane	α -Al ₂ O ₃		
Unutrašnji prečnik cevi	7 mm		
Spoljni prečnik cevi	10 mm		
Dužina cevi	250 mm		
Aktivna površina	46,2 cm ²		
Naziv membrane	M50	M100	M200
Aktivni sloj membrane	ZrO ₂	ZrO ₂	α -Al ₂ O ₃
Srednji prečnik pora	50 nm	100 nm	200 nm

Kao promotor turbulencije korišćen je Kenics statički mešač koji se sastojao od 30 elemenata, širine D = 6,35 mm i dužine L = 7 mm (slika 1).



Slika 1. Kenics statički mešač
Figure 1. Kenics static mixer

Ispitivanje procesa mikrofiltracije, sa i bez promotora, vršeno je pri različitim protocima napojne smeše i različitim transmembranskim pritiscima, pri čemu su se i filtrat i retentat vraćali nazad u posudu sa napojnom smešom radi održavanja konstantnih fizičkih osobina smeše. Zapremina napojne smeše u posudi je iznosila 2500 cm³ [14].

Protok napojne smeše kroz modul je regulisan promenom broja obrtaja recirkulacione pumpe i kretao se u opsegu od 150 do 3000 cm³/min. Ispitivanja su obavljena za transmembranske pritiske u opsegu od 30 do 100 kPa. Temperatura napojne smeše se održavala

konstantnom pomoću termostata. Svi eksperimenti su izvođeni na temperaturi napojne smeše od 50 + 0.5°C.

Fluks kroz membranu je izračunavan na osnovu aktivne površine membrane i potrebnog vremena za prikupljanje 5 cm³ filtrata [14].

U istraživanjima je korišćeno rekonstituisano obrano mleko u prahu (10% mas.). Obrano mleko u prahu, proizvedeno u "Mlekari Subotica", rastvarano je postepenim dodavanjem destilovane vode. Homogenizacija rastvora je izvršena na sobnoj temperaturi pomoću magnetne mešalice. Nakon toga, rastvor mleka je profiltriran kroz gazu radi izdvajanja nerastvornih čestica i eventualno prisutnih stranih primesa. Obrano mleko je, nakon pasterizacije (75°C, 15 s), hladeno do 50°C, i na ovoj temperaturi održavano najmanje 30 min pre početka mikrofiltracije [14].

Pre svakog eksperimenta, membrane su čišćene prema preporukama proizvođača. Postupak čišćenja je ponavijan sve dok nije postignut fluks destilovane vode za čistu membranu.

U cilju boljeg razumevanja fenomena prljanja membrane izvršeno je određivanje otpora prljanja. Sve izračunate vrednosti otpora se odnose na merenja izvršena na temperaturi od 50°C. Otpor čiste membrane (R_m) izračunavan je preko fluksa destilovane vode po jednačini:

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad (1)$$

gde su J_w zapreminski fluks destilovane vode kroz membranu, TMP transmembranski pritisak i μ_w dinamička viskoznost vode.

Ukupan hidraulički otpor prljanja (R_t) je izračunavan kao:

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_f J_f} \quad (2)$$

gde su J_f zapreminski fluks filtrata kroz membranu i μ_f dinamička viskoznost filtrata. Ukupni hidraulički otpor se može podeliti na otpor čiste membrane (R_m) i otpor prljanja membrane (R_f) [15]:

$$R_t = R_m + R_f \quad (3)$$

Otpor prljanja se, sa druge strane, takođe može podeliti na otpor usled nepovratnog prljanja (R_{ire}) i otpor usled povratnog prljanja (R_{re}) [15]:

$$R_f = R_{ire} + R_{re} \quad (4)$$

Nakon ispitivanja mikrofiltracije, membrana je ispirana vodom na sobnoj temperaturi u trajanju od 30 min. Na osnovu određenih vrednosti fluksa destilovane vode nakon ispiranja (J_{w, ire}), izračunavan je otpor usled nepovratnog prljanja (R_{ire}) po jednačini:

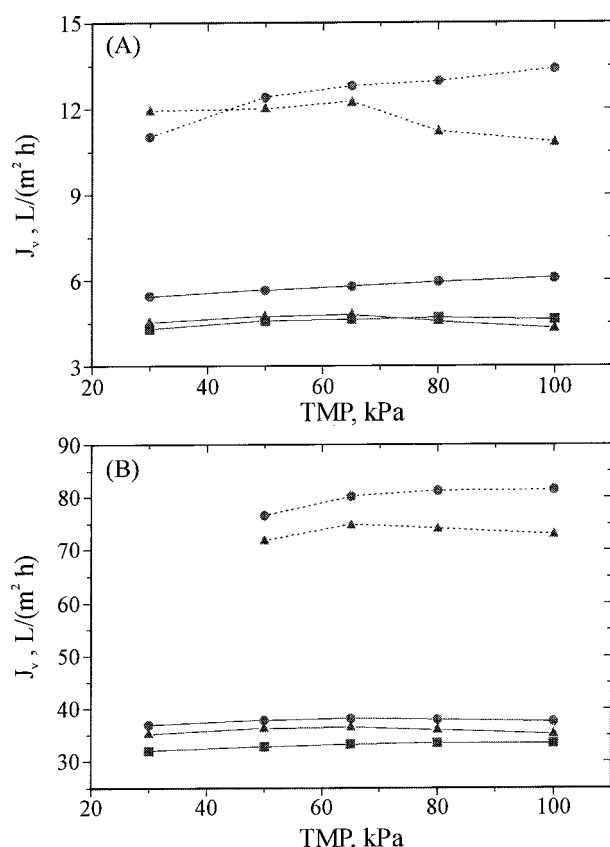
$$R_{ire} = \frac{TMP}{\mu_w J_{w, ire}} - R_m \quad (5)$$

Odgovarajući otpor usled povratnog prljanja (R_{re}) se onda izračunavao iz jednačine (4).

U cilju boljeg razumevanja fenomena prljanja, izvršeno je i određivanje fluksa destilovane vode (J_w) nakon jednog čišćenja bazom (2% mas. NaOH). Na taj način je, preko jednačine (1), izračunavan otpor "očišćene" membrane (R_m).

REZULTATI I DISKUSIJA

Na Slici 2 prikazane su vrednosti fluksa filtrata dostignute u stacionarnom stanju u funkciji transmembranskog pritiska, sa i bez primene promotora turbulencije. Ispitivanja su obavljena pri protocima napojne smeše od $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ ($Re = 3400$) i $2200 \text{ cm}^3/\text{min}$ ($Re = 7500$). Reynolds-ov broj je izračunavan kao $Re = \rho \bar{w} d / \mu$, gde su \bar{w} brzine proticanja napojne smeše kroz modul, a d prečnik membrane. Za gustinu (ρ) i viskoznost (μ) obratnog mleka na 50°C uzete su vrednosti od 1035 kg/m^3 i $0,92 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [16]. Treba napomenuti da, u slučaju upotrebe promotora turbulencije, brzina proticanja \bar{w} predstavlja prividnu brzinu koja je, usled prisustva promotora, manja od stvarne brzine proticanja. Kako je za Re od 3400 fluks kroz M50 membranu bio manji u odnosu na druge dve membrane, ova membrana nije ispitivana za $Re = 7500$. Sa slike se može videti da, bez obzira na vrednost protoka i primenu promotora, transmem-



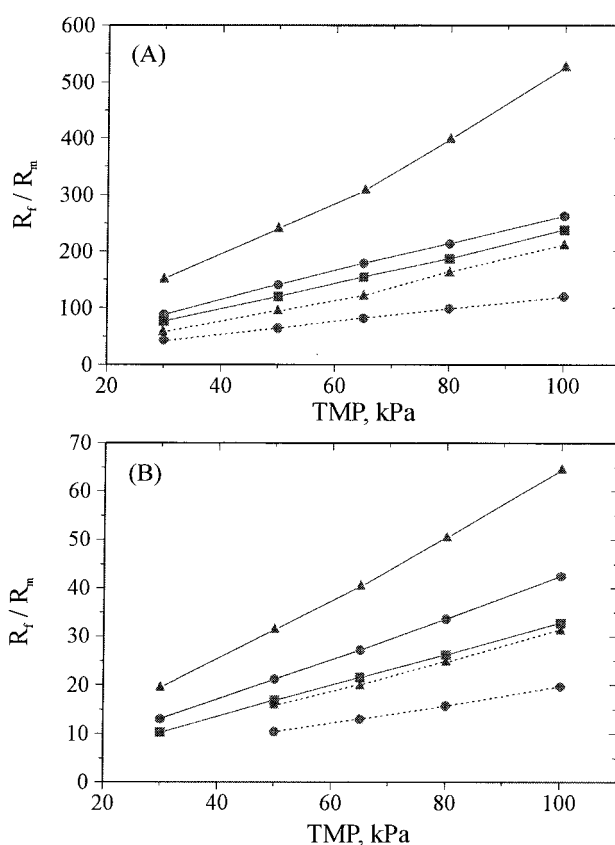
Slika 2. Promena fluksa filtrata sa transmembranskim pritiskom bez primene promotora (A) i sa primenom promotora (B). Re broj: 3400; 7500. Membrana: M50; M100; M200.

Figure 2. Filtrate flux variation with transmembrane pressure without promoter (A) and with promoter (B). Re number: 3400; 7500. Membrane: M50; M100; M200.

branski pritisak ne utiče značajnije na fluks filtrata. Kod M200 membrane sa srednjim prečnikom pora od 200 nm zapaženo je čak i opadanje fluksa pri pritiscima većim od 65 kPa. Primenom promotora, ovaj pad fluksa je bio manje izražen.

Povećanjem protoka se može postići izvesno povećanje fluksa pri svim ispitivanim pritiscima (Slika 2A), ali sa Slike 2B se vidi da se primenom promotora turbulencije mogu dobiti daleko veće vrednosti fluksa pri svim ispitivanim uslovima. Upotrebom M100 membrane, u gotovo svim slučajevima, dobijen je veći fluks nego kod M200 membrane, iako ova membrana ima veće pore. U odsustvu promotora, pri većim pritiscima fluks kroz M200 membranu je bio manji čak i od fluksa kroz M50 membranu, koja ima pore četiri puta manje veličine.

U cilju boljeg razumevanja fenomena prljanja, izvršeno je izračunavanje otpora prljanja (R_f) pri različitim pritiscima. Za dinamički viskozitet filtrata uzeta je vrednost od $0,80 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (srednja vrednost za sve tri membrane) [14]. Kako su otpori čistih membrana (R_m) različiti, radi poređenja zaprljanosti membrana, otpori prljanja su prikazani preko normalizovanog otpora R_f/R_m (Slika 3).

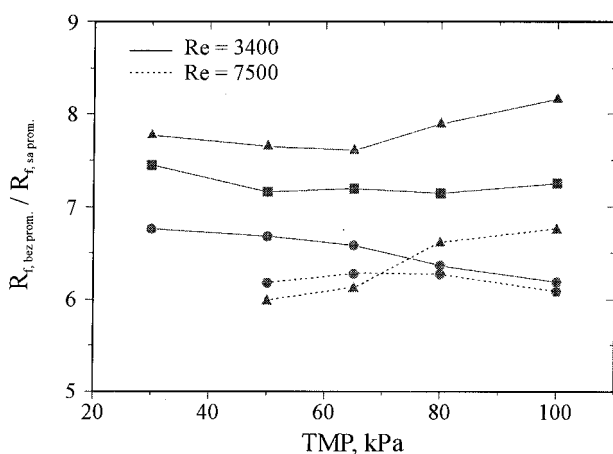


Slika 3. Promena R_f/R_m sa transmembranskim pritiskom bez primene promotora (A) i sa primenom promotora (B). Re broj: 3400; 7500. Membrana: M50; M100; M200.

Figure 3. R_f/R_m variation with transmembrane pressure without promoter (A) and with promoter (B). Re number: 3400; 7500. Membrane: M50; M100; M200.

Povećanjem pritiska, povećava se otpor R_f/R_m kod sve tri membrane, bez obzira da li se koristi promotor turbulencije. Takođe, može se primetiti da su najmanje vrednosti otpora R_f/R_m dobijene za M50 membranu (koja ima najveći otpor membrane), dok je najveće prljanje primećeno kod M200 membrane sa najvećim porama. Povećanjem protoka na oko dva puta veću vrednost, zapaženo je dvostruko smanjenje otpora usled prljanja kod M100 i M200 membrana. Primenom promotora, otpori usled prljanja kod sve tri membrane se značajno smanjuju (za skoro red veličine), ali i dalje M50 membrana ima najmanji, a M200 najveći otpor.

Na Slici 4 je preko odnosa otpora prljanja R_f , bez prom./ R_f , sa prom. prikazan doprinos promotora turbulencije smanjenju otpora prljanja pri različitim transmembranskim pritiscima.



Slika 4. Promena odnosa R_f , bez prom./ R_f , sa prom. sa transmembranskim pritiskom. Membrana: M50; M100; M200.

Figure 4. Ratio R_f , without prom./ R_f , with prom. as function of transmembrane pressure. Membrane: M50; M100; M200.

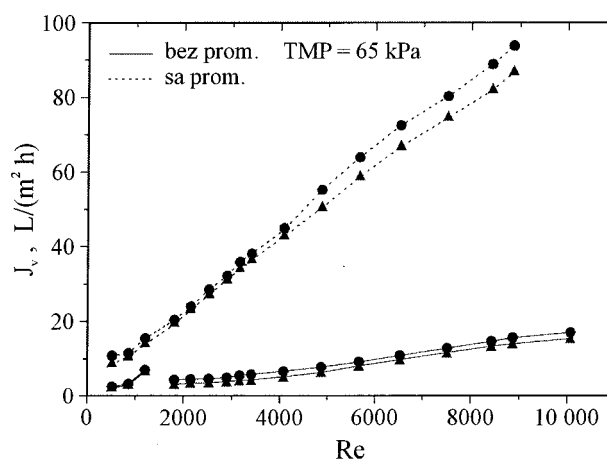
Za sve membrane pri svim ispitivanim operativnim uslovima, primenom promotora došlo je do značajnog smanjenja otpora usled prljanja membrane. Najveće vrednosti R_f , bez prom./ R_f , sa prom. su dobijene za M200 membranu kod koje je zapaženo najveće prljanje (Slika 3). Treba još primetiti da su kod M100 i M200 membrana za Re od 3400 dobijene veće vrednosti R_f , bez prom./ R_f , sa prom. nego za Re = 7500.

Smanjenje otpora povećanjem protoka i upotrebom promotora ukazuje na smanjenje negativnih efekata koji se javljaju na površini membrane. Međutim, efekti prljanja su najizraženiji kod membrane sa najvećim porama (M200), i to pri najvećim transmembranskim pritiscima (Slika 3). Ovo ukazuje da dolazi i do unutrašnjeg prljanja, čiji doprinos ukupnom prljanju postaje sve izraženiji sa povećanjem prečnika pora membrane.

Membrana sa srednjim prečnikom pora od 50 nm (M50) se u suštini ubraja u ultrafiltracione membrane, što potvrđuju rezultati dobijeni upotrebom ove membrane (Slike 3 i 4). Promena otpora prljanja sa pritiskom

ukazuje da je otpor usled površinskog prljanja dominantni otpor prljanja kod M50 membrane, i primenom promotora turbulencije može se ostvariti značajno smanjenje ovog otpora. Međutim, kako su mikrofiltracione membrane M100 i M200 imale veći fluks filtrata od M50 membrane, naredna ispitivanja su obavljena sa ovim membranama.

Na Slici 5 je prikazana promena fluksa filtrata u stationarnom stanju sa Re brojem pri transmembranskom pritisku od 65 kPa, prilikom upotrebe promotora turbulencije, kao i bez nje. Ispitivanja su obavljena za Re od 500 do 10000 (protok napojne smeše od 150 do 3000 cm^3/min). Izbor pritiska je izvršen na osnovu činjenice da je pri vrednostima većim od 65 kPa zapaženo povećano prljanje, naročito kod M200 membrane (Slika 3).

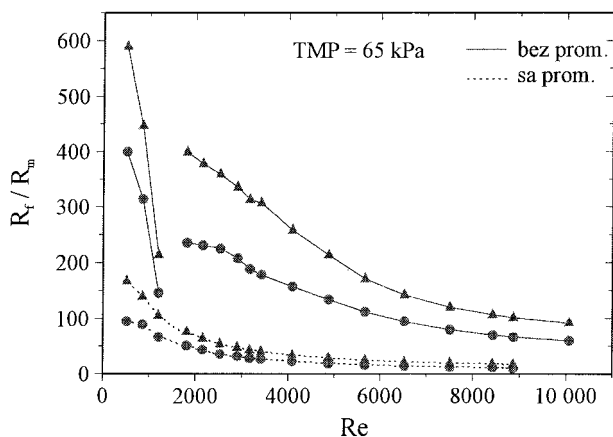


Slika 5. Promena fluksa filtrata sa Re brojem. Membrana: M100; M200.

Figure 5. Filtrate flux as function of Re number. Membrane: M100; M200.

Upotrebom promotora turbulencije dobijeno je značajno povećanje fluksa za obe membrane, pri svim ispitivanim protocima. Slična zavisnost fluksa od Re, dobijena za obe membrane, može se objasniti izborom transmembranskog pritiska; sa slika 2–4 vidi se da do značajnijih razlika u ponašanju membrana dolazi pri pritiscima većim od 65 kPa. Nešto veće vrednosti fluksa su dobijene za M100 membranu, iako ona ima pore manje veličine. Ovo je već primećeno prilikom mikrofiltracije obranog mleka [12, 13] i objašnjeno je povećanim prljanjem unutar pora kod M200 membrane i drugim efektima kao što su međusobne interakcije rastvoraka i interakcije između membrane i rastvoraka [12].

Na osnovu promene fluksa sa Re pri manjim vrednostima Re, u slučaju kada nije korišćen promotor, dobijene promene fluksa ukazuju da do prelaska iz laminarnog u turbulentni režim strujanja dolazi već pri Re vrednostima od oko 1300. Primenom promotora nije zapažena ovakva promena fluksa što ukazuje da već pri malim Re vrednostima dolazi do turbulentnog proticanja kroz modul.

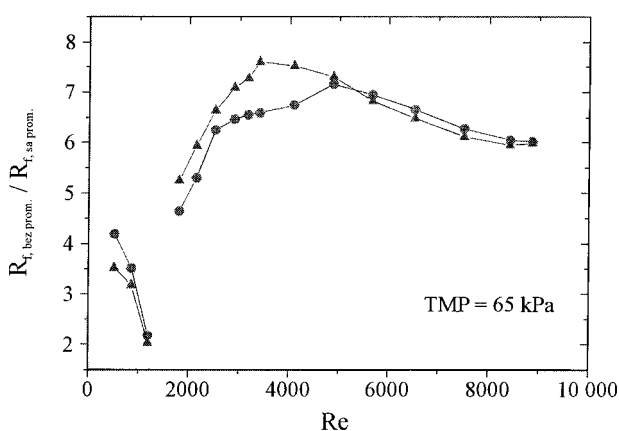


Slika 6. Promena R_f/R_m sa Re brojem. Membrana: M100; M200.
Figure 6. Ratio R_f/R_m as function of Re number. Membrane: M100; M200.

Na Slici 6 je prikazana promena normalizovanog otpora sa protokom. Povećanjem protoka smanjuje se otpor R_f/R_m kod obe membrane. Kao i kod ispitivanja pri različitim pritiscima, M200 membrana ima veći otpor prljanja od M100 membrane, pri svim ispitivanim protocima. Primenom promotora, otpori usled prljanja se značajno smanjuju.

Zavisnost R_f/R_m od Re, sa i bez upotrebe promotora, ukazuje da se povećanjem turbulencije i smicajnih sila na površini membrane, otpor R_f/R_m asimptotski približava nekoj vrednosti za koju povećanje protoka više nema uticaja na smanjenje prljanja membrane. Ovo je u saglasnosti sa prethodnim zapažanjima da pri velikim protocima otpor usled unutrašnjeg prljanja membrane postaje dominantni otpor prenosu mase, naročito kod M200 membrane sa najvećim porama.

Na Slici 7 je prikazana promena odnosa R_f , bez prom./ R_f , sa prom. sa Re brojem. Pojava maksimuma u oblasti Re od 3000 do 5000 je posledica upotrebe promotora. Naime, primenom promotora dolazi do povećanja



Slika 7. Promena odnosa R_f , bez prom./ R_f , sa prom. sa Re brojem. Membrana: M100; M200.

Figure 7. Ratio R_f , without prom./ R_f , with prom. as function of Re number. Membrane: M100; M200.

nja turbulencije i brzine smicanja na površini membrane, usled čega pri manjim Re vrednostima dolazi do značajnijeg povećanja fluksa (Slika 5).

Pri velikim protocima fluks se linearno menja sa Re (Slika 5) u oba slučaja (sa i bez promotora) [14], pa odnos R_f , bez prom./ R_f , sa prom. dostiže konstantnu vrednost nešto veću od 6 (Slika 7). Dakle, primenom promotora ostvaruje se smanjenje otpora prljanja više od 6 puta što je čak i veće od vrednosti dobijenih upotrebom iste vrste promotora [6-8].

Opisivanje fenomena prljanja membrane se obično vrši mehanizmima formiranja sloja na površini membrane, sužavanja i zapušavanja pora, kao i blokiranja pora. U cilju određivanja doprinosa svakog od ovih mehanizama ukupnom prljanju, nakon ispitivanja mikrofiltracije izvršeno je ispiranje membrane vodom i zatim određivanje fluksa destilovane vode. Na taj način je određen otpor usled nepovratnog prljanja (R_{ire}), koji se može pripisati unutrašnjem prljanju i adsorpciji proteina. Razlika do ukupnog otpora prljanja (R_f) predstavlja otpor usled povratnog prljanja (R_{re}), do koga dolazi usled fenomena koncentracione polarizacije i taloženja na površini membrane. U Tabeli 2 su prikazani doprinosi pojedinih otpora prljanja, izračunati na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem uticaja promotora na pritisku od 65 kPa i protoku od 1000 cm^3/min .

Tabela 2. Uticaj promotora turbulencije na promenu otpora prljanja

Table 2. Effect of turbulence promoter on fouling resistance variations

	M50		M100		M200	
	bez prom.	sa prom.	bez prom.	sa prom.	bez prom.	sa prom.
$R_m \cdot 10^{-11}, \text{m}^{-1}$	4,10		2,82		1,98	
$R_t \cdot 10^{-12}, \text{m}^{-1}$	63,2	8,78	50,4	7,66	60,9	8,01
$R_f \cdot 10^{-12}, \text{m}^{-1}$	62,8	8,37	50,1	7,38	60,7	7,82
$R_{re} \cdot 10^{-12}, \text{m}^{-1}$	59,8	6,68	43,3	4,62	46,3	4,30
$R_{ire} \cdot 10^{-12}, \text{m}^{-1}$	2,97	1,69	6,82	2,76	14,4	3,52
$R_m' \cdot 10^{-11}, \text{m}^{-1}$	4,79	4,18	5,02	4,60	3,67	3,61
R_f/R_m	153	20,4	178	26,2	307	39,5
R_{re}/R_m	146	16,3	153	16,4	234	21,7
R_{ire}/R_m	7,25	4,13	24,2	9,77	72,8	17,8
R_m'/R_m	1,17	1,02	1,78	1,63	1,85	1,82

U slučaju kada nije korišćen promotor, prljanje je bilo najveće kod M200 membrane ($R_f/R_m = 307$). Iz tabele se takođe može videti da povratno prljanje (R_{re}/R_m) ima mnogo veći doprinos ukupnom prljanju u odnosu na nepovratno prljanje (R_{ire}/R_m). Otpor R_{ire}/R_m je bio naj-

manji kod M50 membrane (7,25), a najveći kod M200 membrane (72,8), što ukazuje na povećano unutrašnje prljanje sa povećanjem veličine pora.

Primenom promotora turbulencije, iz Tabele 2 se vidi da dolazi do značajnog smanjenja otpora. Glavni doprinos smanjenju otpora predstavlja smanjenje otpora usled povratnog prljanja. Tako je, na primer, kod M100 membrane, primenom promotora, otpor R_{re}/R_m smanjen sa 153 na vrednost od 16,4, dok je otpor R_{ire}/R_m smanjen sa 24,2 na 9,77.

U Tabeli 2 su prikazani i odnosi otpora membrane nakon jednog čišćenja (R_m') i otpora čiste membrane (R_m). Na osnovu ovih rezultata se takođe vidi da je nepovratno prljanje najveće kod M200 membrane, a najmanje kod M50 membrane i smanjuje se upotrebom promotora. Tako je kod M50 membrane, odnos R_m'/R_m u slučaju upotrebe promotora iznosio 1,02, odnosno već nakon jednog čišćenja se praktično dostiže fluks vode za čistu membranu.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitivan uticaj promotora turbulencije na prljanje membrane tokom unakrsne mikrofiltracije obranog mleka. Prljanje membrane prilikom unakrsne mikrofiltracije je složen fenomen; do adsorpcije i taloženja rastvoraka dolazi i na površini membrane i unutar pora.

Ispitivanja pri različitim pritiscima i protocima (Slike 2–7) su pokazala da povećanje protoka napojne smeše kroz modul dovodi do značajnog povećanja fluksa filtrata, dok transmembranski pritisak ne utiče značajnije na fluks. Najveći fluks filtrata je dobijen upotrebom M100 membrane sa srednjim prečnikom pora od 100 nm. Kod M50 membrane dobijene su manje vrednosti fluksa usled većeg otpora membrane, dok je kod M200 membrane zapaženo povećano prljanje membrane, naročito pri većim pritiscima. Iako je aktivni sloj M200 membrane napravljen od materijala različitog u odnosu na druge dve membrane, dobijeni rezultati ukazuju da do povećanog prljanja dolazi usled većih pora kod ove membrane. Dobijeni rezultati ukazuju da formiranje sloja na površini membrane predstavlja glavni otpor prenosu mase, dok sa povećanjem veličine pora membrana raste uticaj otpora usled unutrašnjeg prljanja.

Primenom promotora turbulencije ostvareno je značajno povećanje fluksa filtrata i smanjenje otpora usled prljanja kod svih ispitivanih membrana. Pri istim protocima napojne smeše zapaženo je smanjenje otpora prljanja od oko 6 puta kod M100 i M200 membrana. Glavni doprinos promotora smanjenju ukupnog otpora prenosu mase kroz membranu predstavlja smanjenje otpora usled povratnog prljanja. Naime, upotrebom promotora dolazi do povećanog odnošenja čestica i rastvoraka sa površine membrane, kao i smanjenja efekta koncentracione polarizacije. Treba pomenuti da je upotrebom promotora zapaženo i smanjenje nepovratnog prljanja. Dobijeni rezultati pokazuju da se primenom promotora turbulencije može ostvariti značajno poboljšanje karakteristika unakrsne mikrofiltracije.

LITERATURA

- [1] S. Poyen, F. Quemeneur, B. Bariou, *Int. Chem. Eng.*, **27** (1987) 441.
- [2] S.M. Finnigan and J.A. Howell, *Chem. Eng. Res. Des.*, **67** (1989) 278.
- [3] V. Mavrov, N.D. Nikolov, M.A. Islam, J.D. Nikolova, *J. Membr. Sci.*, **75** (1992) 197.
- [4] B.B. Gupta, J.A. Howell, D. Wu, R.W. Field, *J. Membr. Sci.*, **99** (1995) 31.
- [5] Y. Wang, J.A. Howell, R.W. Field, M.R. Mackley, *Chem. Eng. Res. Des., Trans. Ichem. E.* **72** (Part A) (1994) 686.
- [6] E.W. Pitera and S. Middleman, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **12** (1973) 52.
- [7] A.L. Copas and S. Middleman, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **13** (1974) 143.
- [8] G.N. Vatai and M.N. Tekić, *Chem. Eng. Comm.*, **132** (1995) 141.
- [9] G. Samuelsson, P. Dejmek, G. Trägårdh, M. Paulsson, *Milchwissenschaft*, **52** (4) (1997) 187.
- [10] J.L. Maubois, *Aust. J. Dairy Technol.*, **46** (1991) 91.
- [11] P. Savello, M. Carić, P. Mahmoud, *Aust. J. Dairy Technol.*, **52** (1997) 60.
- [12] A. Pierre, J. Fauquant, Y. Le Great, M. Piot, J.L. Maubois, *Lait*, **72** (1992) 461.
- [13] S. Sachdeva and W. Buchheim, *Aust. J. Dairy Technol.*, **52** (1997) 92.
- [14] R. Rađenović, Ispitivanje uticaja promotora turbulencije na unakrsnu mikrofiltraciju, Diplomski rad, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1999.
- [15] C. Taddei, G. Daufin, P. Aimar, V. Sanchez, *Biotechnol. Bioeng.*, **34** (1989) 171.
- [16] G. Samuelsson, I.H. Huisman, G. Trägårdh, M. Paulsson, *J. Membr. Sci.*, **129** (1997) 277.

SUMMARY

EFFECT OF TURBULENCE PROMOTER ON MEMBRANE FOULING DURING CROSS-FLOW MICROFILTRATION

(Scientific paper)

Darko M. Krstić¹, Radmila N. Rađenović², Marijana Đ. Carić¹,
Spasenija D. Milanović¹, Miodrag N. Tekić¹

¹Tehnološki fakultet, Novi Sad, ²D.O.O. "Nectar", Bačka Palanka

The application of microfiltration is hindered by membrane fouling that results in a decrease in the filtrate flux with time. In microfiltration, fouling occurs both on the membrane surface and within the membrane pores. The use of hydrodynamic methods, such as the use of static turbulence promoters, pulsation of the feed stream, and the production of centrifugal instabilities or secondary flows, have been studied in order to reduce membrane fouling and hence provide flux enhancement.

The aim of this work was to investigate effect of static turbulence promoter on membrane fouling during cross-flow microfiltration of skim milk. Experimental investigations were carried out on 50, 100 and 200 nm ceramic tubular membranes for different operation conditions. Increasing the cross-flow velocity reduced membrane fouling, while increasing the transmembrane pressure resulted in an increase in the fouling rate. The use of turbulence promoter provided significant reduction in membrane fouling (6 times) for M100 and M200 at the same feed flow rate. This results indicate that surface layer resistance dominate the overall fouling resistance. However, as the pore size increases, fouling moves from surface layer phenomenon to internal membrane fouling.

Key words: Cross-flow microfiltration • Turbulence promoter • Membrane fouling • Skim milk •
Ključne reči: Unakrsna mikrofiltracija • Promotor turbulencije • Prljanje membrane • Obrano mleko •