

Uticaj promotora u obliku uvrnute trake na smanjenje prljanja membrane tokom mikrofiltracije mleka

Svetlana S. Popović, Dragica Z. Jovičević, Mirjana S. Đurić, Spasenija D. Milanović, Miodrag N. Tekić

Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

Izvod

Tokom mikrofiltracije mleka membrane se intenzivno prljaju proteinima. Jedan od načina da se smanji prljanje jeste postavljanje promotora turbulencije u cevnu keramičku membranu kako bi se promenio hidrodinamički režim strujanja i pospešilo odnošenje proteina sa površine membrane. U ovom radu su ispitivani promotori turbulencije u obliku uvrnute trake različitog odnosa dužine helikoidnog zavoja i prečnika trake, postavljeni u cevnu keramičku membranu veličine pora od 100 nm namenjenu za mikrofiltraciju mleka. Rezultati ispitivanja potvrdili su da se primenom uvrnute trake postiže značajno smanjenje prljanja, od tri do sedam puta, u zavisnosti od karakteristične veličine zavoja trake. Pokazano je da povećanje transmembranskog pritiska povećava prljanje, čak i pri primeni promotora, dok povećanje protoka kroz membranu dovodi do smanjenja prljanja. Upotrebom uvrnute trake najmanje karakteristične veličine 1,0 prljanje je sedam puta manje u odnosu na rad bez upotrebe promotora zbog toga što se postiže najintenzivnija turbulencija i smanjuje koncentracija proteina u graničnom sloju uz zid membrane.

Ključne reči: promotori turbulencije; mikrofiltracija; prljanje membrane; proteini mleka.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Poslednjih 30 godina membranski procesi su postali jedna od najznačajnijih tehnika u prehrambenoj industriji, kao i u tehnologiji obrade vode [1]. Nesumnjivo, u prehrambenoj industriji, najveći broj membranskih procesa se primenjuje za koncentrisanje i frakcionisanje proteina mleka i preradu nusproizvoda kao što je surutka. U zavisnosti od veličine pora membrane i primenjenih radnih uslova zastupljena su četiri tipa membranskih procesa: ultrafiltracija kao najzastupljenija sa 350.000 m² instalirane površine membrana, nanofiltracija sa 100.000 m², reversna osmoza sa 65.000 m² i mikrofiltracija sa 15.000 m² [1]. Mikrofiltracija se uspešno koristi za uklanjanje bakterija iz obranog mleka i selektivno koncentrisanje kazeina u proizvodnji sira [2,3]. Cevne keramičke membrane sa srednjim prečnikom pora od 0,1 μm našle su primenu u koncentrisanju prirodnog kazeina zbog visokog kvaliteta i hemijske i mehaničke otpornosti [4]. Ipak, negativna karakteristika membranskih procesa uopšte, pa tako i onih primenjenih u industriji mleka jeste prljanje membrane tokom filtracije što rezultira značajnim opadanjem fluksa permeata. Usled prljanja, membrane se u industriji mleka čiste jednom dnevno kako bi se regenerisao fluks, što dodatno smanjuje efikasnost celog procesa [5].

Istraživanja u oblasti membranskih tehnologija uglavnom su usmerena na ispitivanje prljanja membrana sa ciljem njegovog smanjenja i povećanja fluksa kako bi se

NAUČNI RAD

UDK 637.147:66.067

Hem. Ind. 65 (3) 233–239 (2011)

doi: 10.2298/HEMIND110125012P

povećala i efikasnost procesa [6–8]. Smanjenje prljanja može se postići različitim tehnikama: modifikacijom površine membrane [9], primenom elektromagnetnih i mehaničkih metoda [10,11], promenom hidrodinamičkog režima u membrani i modulu [12–16]. Jedna od takvih tehnika je i promena hidrodinamičkog režima u membrani postavljanjem elemenata različitog geometrijskog oblika, tzv. promotora turbulencije, u cev membrane čime se postiže smanjenje koncentracione polarizacije i površinskog prljanja membrane. Na ovaj način pospešuje se prenos mase i poboljšavaju selektivne karakteristike membrane. Treba napomenuti da se ove metode uglavnom primenjuju u slučaju cevnih, uglavnom, keramičkih membrana. Tako se primenom promotora u obliku glatke šipke ili šipke sa navojima postižu poboljšanja fluksa od oko 25 odnosno 100% u filtraciji pekarskog kvasca [17] i oko 90% tokom filtracije suspenzije bentonita [13]. Promotor turbulencije koničnog oblika pokazao se efikasnijim od glatke šipke tokom filtracije dekstrana, obezbeđujući poboljšanje fluksa od 300% [18]. Šest puta veći fluks dobijen je umetanjem promotora u vidu zavrtanja u filtraciji mleka i pekarskog kvasca [19]. Primena keniks miksera kao promotora turbulencije u filtraciji mleka i pekarskog kvasca pokazala se veoma uspešnom [20,21]. Primenom keniks miksera u filtraciji mleka zapaženo je povećanje fluksa od 500 do 600% sa brzinama proticanja koje odgovaraju laminarnom i prelaznom režimu strujanja [14,15]. Značajna povećanja fluksa ostvarena su zahvaljujući smanjenju koncentracione polarizacije i površinskog prljanja membrane u prisustvu promotora u membranskoj cevi. Promotori turbulencije deluju na više načina. Nji-

Preписка: S.S. Popović, Tehnološki fakultet, Bulevar Cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija.

E-pošta: popovics@tf.uns.ac.rs

Rad primljen: 25. januar, 2011

Rad prihvaćen: 18. februar, 2011

hovim prisustvom povećava se turbulencija u membrani usled povećanja brzine zbog smanjenja površine poprečnog preseka za proticanje. Zatim, u zavisnosti od geometrije oni obezbeđuju i promenu smera strujnica fluida i time razbijanje graničnog sloja na zidu membrane uz pojavu mešanja. Negativna karakteristika promotora turbulencije jeste povećanje gradijenta pritiska duž membrane što je nepoželjno kod membranskih procesa sa pritiskom kao pogonskom silom, kao što je mikrofiltracija. Takođe, ukoliko je gradijent pritiska veliki, rad pri što uniformnijem i nižem transmembranskom pritisku (TMP), a koji se preporučuje kod mikrofiltracije mleka kako ne bi došlo do značajnije promene selektivnih karakteristika membrane, nije moguć [22].

Promotori turbulencije u obliku uvrnutih traka uspešno se primenjuju kod povećanja prenosa toplote u razmenjivačima toplote različitog oblika [23–26]. Prednosti promotora u obliku uvrnute trake je u tome što obezbeđuju turbulentan tok uz znatno niži pad pritiska u odnosu na druge promotore kao što je zavrtanj ili keniks mikser. Primena promotora u obliku uvrnute trake zabeležena je samo u filtraciji rastvora dekstrana. Sugimoto i sar. [27] pokazali su da se mogu ostvariti četiri puta manje prljanje umetanjem uvrnute trake u membranu, odnosno sedam puta primenom keniks miksera. Međutim, pad pritiska je bio proporcionalno veći, što je uticalo i na povećanu potrošnju energije.

Imajući u vidu prethodno navedena rezultate, u ovom radu ispitivan je uticaja promotora u obliku uvrnute trake na prljanje membrane proteinima mleka sa ciljem povećanja efikasnosti procesa. Promotri u obliku uvrnute trake su relativno jednostavne geometrije i ne stvaraju veliki otpor proticanju i naprezanja što je naročito značajno kod filtracije prirodnih materija kao što su proteini, radi sprečavanja denaturacije. Ispitan je uticaj uvrnutih traka različite karakteristične veličine (odnos dužine helikoidnog elementa i prečnika promotora) kao najznačajnijeg parametra koji odražava nivo intenziteta turbulencije.

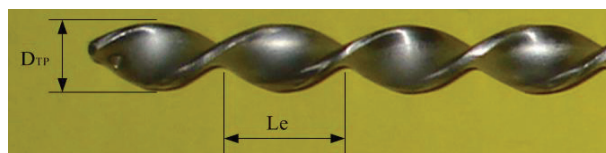
EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalna ispitivanja mikrofiltracije izvedena su na laboratorijskoj aparaturi za mikrofiltraciju/ultrafiltraciju sa cevnim membranskim modulom, u celosti izrađenoj od nerđajućeg čelika. Napojna smeša je transportovana kroz modul pomoću višestepene centrifuge

galne pumpe (CM-9, Grundfos, Nemačka). Operativni protok ($1,0\text{--}5,0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) i transmembranski pritisak ($TMP = 50\text{ kPa}$) podešavani su pomoću bajpas ventila i ventila glavnog toka, dok su njihove vrednosti praćene pomoću ultrazvučnog merača protoka (DFXL, Dynasonics, USA) i digitalnih manometara na ulazu i izlazu iz modula. Temperatura je održavana konstantnom ($50\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) pomoćnim fluidom u plaštu napojnog suda i praćena digitalnim termometrom. Permeat i retentat su recirkulisani u napojni sud. Masa permeata je merena kontinualno, u određenim vremenskim intervalima, pomoću digitalne vage (EG 1500-2M, Kern, Nemačka) sa direktnim prenosom podataka na personalni računar (PC).

Eksperimenti su izvođeni na kompozitnoj keramičkoj membrani (Gea Exekia, Francuska), dužine 250 mm i unutrašnjeg prečnika 6,8 mm. Aktivna površina membrane je iznosila $46,2\text{ cm}^2$, dok je srednja veličina pora $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Nosač membrane je napravljen od $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, a aktivni sloj od ZrO_2 .

U eksperimentalnom istraživanju primenjeni su promotori turbulencije helikoidne geometrije u obliku uvrnute trake (slika 1) čije su karakteristike prikazane u tabeli 1.



Slika 1. Promotor turbulencije u obliku uvrnute trake.
Figure 1. A twisted tape turbulence promoter.

Eksperimenti filtracije, bez i sa primenom promotora, izvođeni su pri različitim brzinama proticanja uz potpunu recirkulaciju retentata i filtrata u napojnu posudu. Svaki eksperiment se sastojao od sledećih koraka: merenje fluksa čiste vode, filtracija mleka, ispiranje, merenje fluksa nakon ispiranja, hemijsko čišćenje, ispiranje i merenje fluksa vode očišćene membrane. Pre svakog eksperimenta filtracije mleka, meren je fluks destilovane vode. Pre filtracije, voda je pražnjena iz pumpe pomoću ventila za pražnjenje pumpe kako bi zapremina zaostale vode bila minimalna i ne bi uticala na sastav mleka. U svakom eksperimentu filtrirano je 7 L obranog pasterezovanog mleka sa prosečno 3,2% proteina mleka (Dukat, Sombor, Srbija), na temperaturi od

Tabela 1. Karakteristike promotora turbulencije (Proizviđač/dobavljač: Inox bravarija, B. Petrovac, Srbija; materijal: nerđajući čelik)
Table 1. Characteristics of twisted tape turbulence promoters

Oznaka	UT2,5	UT1,5	UT1,0
Prečnik promotora, D_{TP} / mm	6,3	6,5	6,5
Dužina promotora, L_{TP} / mm	243	240	241
Broj elemenata, N_{TP}	16	25	36
Karakteristična veličina, $O_{TP} = L_e/D_{TP}$	2,5	1,5	1,0

50 ± 0,5 °C u trajanju od 90 min. Pre filtracije mleko je zagrevano na 50 °C pola sata. Posle svakog eksperimenta membrana je čišćena prema proceduri preporučenoj od strane proizvođača i postupak je ponavljan do zadovoljavajuće regeneracije fluksa destilovane vode.

Prljanje membrane, odnosno ukupni otpor prljanja membrane, R_{tf} , opisan je modelom serijskih otpora:

$$R_{tf} = R_m + R_f = R_m + R_{ire} + R_{re} \quad (1)$$

Pored otpora čiste membrane, R_m , javlja se i otpor usled prljanja membrane, R_f . Hidraulički otpor membrane, R_m , izračunava se pomoću fluksa destilovane vode iz Darsijevog zakona:

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad (2)$$

gde je J_w – fluks i μ_w – viskozitet destilovane vode.

Ukupni otpor prljanja izračunava se iz izmerenog fluksa filtrata, J_f , i viskoziteta filtrata, μ_f :

$$R_f = \frac{TMP}{\mu_f J_f} - R_m \quad (3)$$

Otpor prljanja, R_f , moguće je razložiti na dva otpora: otpor usled povratnog prljanja, R_{rev} , koji obuhvata koncentracionu polarizaciju i površinsko prljanje membrane, R_{ire} . Nakon filtracije membrane su ispirane vodom pri velikoj brzini proticanja, nakon čega je meren fluks destilovane vode, J_{ire} , što je omogućilo određivanje otpora uzrokovanog nepovratnim prljanjem u porama membrane, R_{ire} :

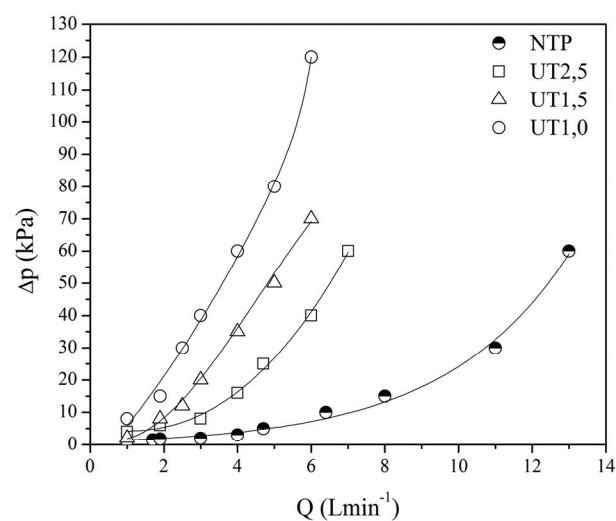
$$R_{ire} = \frac{TMP}{\mu_w J_{ire}} - R_m \quad (4)$$

REZULTATI I DISKUSIJA

Istraživanje je izvedeno primenom tri promotora turbulencije u obliku uvrnute trake. Geometrija ovih promotora je helikoidna, ali se razlikuju po karakterističnoj veličini. Karakteristična veličina predstavlja odnos dužine jednog zavoja (helikoidnog elementa) i prečnika promotora turbulencije. Upravo od karakteristične veličine zavisi kolika će se turbulencija postići u membrani pri primeni istog protoka. Osim karakteristične veličine veoma je bitno i da prečnik promotora ne bude mnogo manji od prečnika membrane jer bi to dovelo do smanjenja napona smicanja na zidu membrane. U ovom slučaju zazor između zida membrane i promotora je bio između 0,15 i 0,25 mm; preporučenom opsegu je do 0,7 mm [19].

Primena promotora smanjuje poprečni presek membrane i uzrokuje veće padove pritiska u odnosu na praznu membranu što može uticati na izbor TMP. Izmereni apsolutni padovi pritiska za praznu membranu i mem-

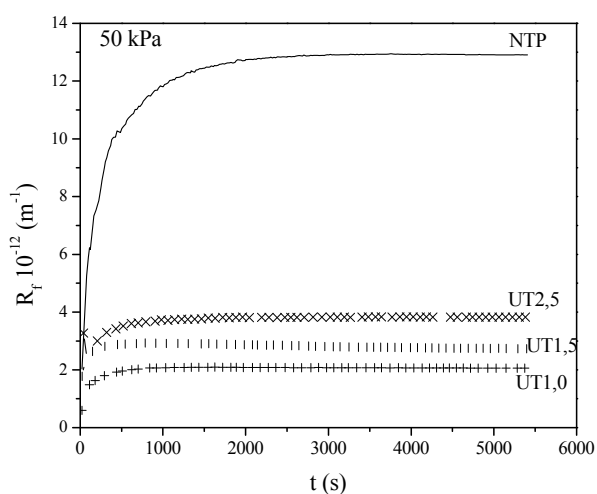
branu sa uvrnutim trakama su prikazani na slici 2. Kao što se moglo i očekivati, uvrnute trake (UT) uzrokuju veće padove pritiska u odnosu na membranu bez promotora (NTP). Padovi mogu biti i do deset puta veći što zavisi od primenjenog protoka i karakteristične dimenzije trake. Naravno, pad pritiska je najmanji u slučaju uvrnute trake najveće karakteristične dimenzije 2,5, a najveći u slučaju najgušće trake karakteristične dimenzije 1,0. Pri manjim protocima, do oko 2,0 L min⁻¹, razlike u padovima pritiska za sve uvrnute trake su male, ali se nelinearno povećavaju sa porastom protoka. Međutim, pad pritiska ni za jednu od traka nije uslovljavao izbor TMP, i u celom ispitivanom opsegu moglo se raditi na preporučenim niskim TMP ispod 100 kPa.



Slika 2. Pad pritiska duž membrane u funkciji protoka.
Figure 2. Pressure drops versus cross-flow rate.

Za analizu uticaja promotora turbulencije u obliku uvrnute trake (UT) na prljanje membrane izračunavani su ukupni i pojedinačni otpori prljanja iz jednačina (1)–(4). Na slici 3 prikazane su krive ukupnog otpora prljanja membrane tokom filtracije, bez i sa primenom promotora turbulencije, pri protoku od 3,0 L·min⁻¹ ($Re = 10500$) i transmembranskom pritisku (TMP) 50 kPa. Na slici 3 se može primetiti da sve krive otpora imaju sličan oblik bez obzira na to da li je primenjen promotor (UT) ili ne (NTP), ali se kvantitativno značajno razlikuju. Karakteristično je da u slučaju bez promotora (NTP) otpor naglo raste u prvih nekoliko minuta filtracije usled formiranja sloja koncentracione polarizacije. U narednih nekoliko minuta primećuje se blaži, ali ipak porast otpora uzrokovan taloženjem i adsorpcijom proteina na površini membrane, dok se nakon oko 40 min ne ustali na približno stacionarnoj vrednosti. Za krive otpora sa primenom promotora (UT2,5, UT1,5 i UT1,0) takođe je karakterističan nagli porast otpora u prvih nekoliko minuta filtracije, a zatim se vrlo brzo uspostavlja stacionarno stanje, i to već do desetog minuta filtracije i do

kraja nema daljeg povećanja otpora. Dakle, kada se primeni promotor, stacionarno stanje se uspostavlja ranije u odnosu na filtraciju bez promotora, dok je period taloženja proteina na membrani skraćen. Ovakav rezultat je i očekivan s obzirom na to da trake menjaju način proticanja kroz membranu. Naime, helikoidna geometrija menja oblik strujnica iz pravog u helikoidan oblik, čime se proteini skoncentrisani u blizini membrane ili nataloženi na površini skidaju i odnose. Strujnice su upravo najduže uz samu površinu membrane odnosno u graničnom sloju gde i dolazi do nagomilavanja proteina. Takođe, između dva zavoja trake dolazi do pojave lokalnih vrtloga koji lokalno mešaju fluid sprečavajući taloženje na površini membrane.

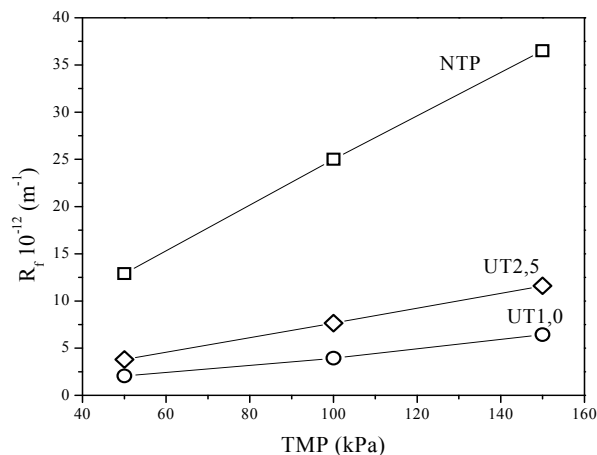


Slika 3. Uticaj promotora turbulencije pri protoku od $3,0 \text{ L min}^{-1}$ ($Re = 10500$) i TMP 50 kPa .

Figure 3. Influence of turbulence promoter for the cross-flow rate of 3.0 L min^{-1} and TMP of 50 kPa .

Upotrebom uvrnutih traka postiže se smanjenje otpora prljanja za red veličine. Tako je za rad bez promotora ukupni otpor $1,3 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ dok je primenom UT1,0 ukupni otpor $2,0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$. Dalje, poređenjem vrednosti otpora za trake različitih karakterističnih veličina, primećuje se da otpor opada sa smanjenjem karakteristične veličine trake, te je najniži u slučaju uvrnute trake sa najgušćim navojima, odnosno najmanjom karakterističnom veličinom 1,0 (UT1,0). Ovo je i logično s obzirom na to da je kod najgušće trake najveća površina membrane obuhvaćena vrtloženjem, a helikoidna putanja strujnica najduža, što znači da je skidanje i odnošenje u graničnom sloju najintenzivnije. Helikoidna putanja strujnica i vrtloženje prekidaju aksijalni tok uz zid membrane i tako, delimično ili potpuno, narušavaju stvaranje graničnog sloja. Slična zapažanja su dobijena ispitivanjem promotora različitih karakterističnih veličina [17,27].

Kako je mikrofiltracija proces sa pritiskom kao pogonskom silom, ispitivan je i uticaj transmembranskog pritiska na prljanje membrane (slika 4). Može se primećivati da sa povećanjem TMP dolazi do povećanja otpora pr-



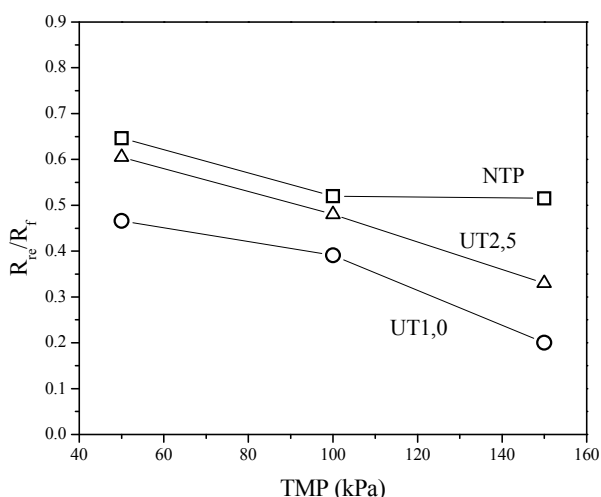
Slika 4. Zavisnost otpora ukupnog prljanja od TMP pri protoku od $3,0 \text{ L min}^{-1}$.

Figure 4. Fouling resistance versus TMP for the cross-flow rate of 3.0 L min^{-1} .

ljanja, što je naročito izraženo za filtraciju bez promotora (NTP). Za konvencionalnu filtraciju bez promotora karakteristično je značajno taloženje i adsorpcija proteina na membrani, što pri velikom TMP dovodi do utiskivanja proteina u pore membrane i povećanja otpora u porama. Dodatno ispitivanje prljanja membrane rađeno je merenjem fluksa vode nakon ispiranja. Tokom ispiranja odvod permeata bio je zatvoren, a primenjena je velika brzina proticanja da bi se uklonilo površinsko prljanje. Nakon ispiranja meren je fluks vode, i izračunavan otpor usled nepovratnog prljanja u porama, jednačina (4), a zatim je iz jednačine (1) izračunavan otpor usled povratnog prljanja, R_{re} . Na slici 4 prikazana je promena udela otpora usled površinskog (povratnog) prljanja u ukupnom otporu u zavisnosti od TMP. Sa povećanjem TMP opada udeo površinskog prljanja u ukupnom prljanju membrane, kako za NTP način rada tako i za rad uz upotrebu promotora. Primenom promotora turbulencije smanjuje se površinsko prljanje membrane, odnosno stvaranje pogače koja zapravo služi i kao dinamička membrana i delimično sprečava prodiranje proteina u pore pri povećanju pritiska. Tako je na 50 kPa udeo površinskog prljanja za NTP način rada oko $0,65$ dok uz primenu UT1,0 iznosi $0,46$ (slika 5). Dinamička membrana se formira u manjoj meri kada se primeni promotor turbulencije, te je u tom slučaju zapaženo da je intenzivnije prodiranje proteina manje dimenzije, čak i na nižem pritisku, a naročito na višem pritisku od 150 kPa gde je za UT1,0 udeo površinskog prljanja svega $0,2$. Nepovratno prljanje, odnosno prljanje u porama, zapravo je nepoželjno jer otežava regeneraciju fluksa membrane i zahteva intenzivno hemijsko čišćenje, ali i zbog toga što utiče na promenu selektivnosti membrane. Kombinovani tip prljanja je karakterističan za filtraciju proteina zbog još uvek nedovoljno razjašnjene interakcije proteina i materijala membrane. Nepovratno prljanje proteinima uglavnom je posledica

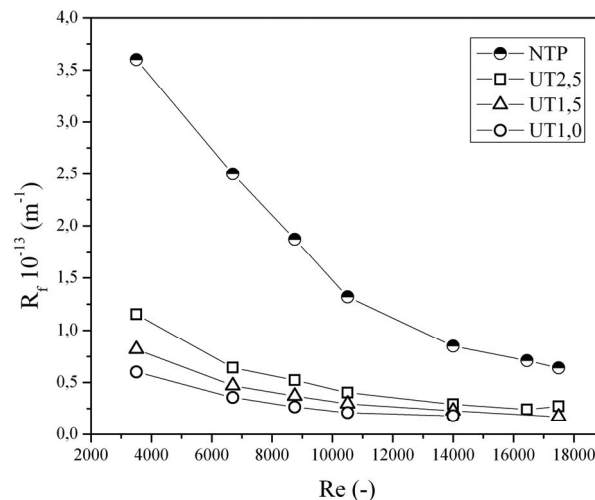
prolaska malih micela kazeina i proteina surutke kroz dinamičku membranu i pore. Na ovaj način se smanjuje efektivni prečnik pore, što utiče na performanse filtracije [28]. Ipak, primenom promotora ukupno prljanje je manje, što opravdava njegovu upotrebu uprkos promeni načina prljanja. Upotreba promotora je značajna, naročito na nižem transmembranskom pritisku, zbog smanjenja kako povratnog tako i nepovratnog prljanja.

Osim transmembranskog pritiska, na intenzitet i način prljanja utiče i protok kroz membranu, odnosno hidrodinamički režim. Povećanjem protoka može se delimično postići smanjenje prljanja zbog povećanja turbulencije u membrani, kako za rad bez promotora tako i za rad sa upotrebom promotora (slika 6). Za ispitivani opseg Re broja koji je u turbulentnom režimu (3500–17500) dolazi do smanjenja ukupnog prljanja membrane, naročito kada se upotrebe promotori turbulencije. Za sve Re brojeve, ukupno prljanje membrane je manje kada se primene promotori. Povećanje protoka ima veći uticaj na smanjenje prljanja membrane bez promotora, što je i logično s obzirom na to da se sa povećanjem protoka povećava turbulencija u membrani. Uticaj promotora je veći pri manjim Re brojevima, zbog toga što pri većim protocima turbulencija koju proizvodi promotor biva prikrivena turbulencijom uzrokovanom povećanjem brzine proticanja kroz membranu. Takođe se može zapaziti da se pri većim protocima naizgled izjednačava efikasnost promotora bez obzira na karakterističnu veličinu. Generalno, otpor prljanja se sa povećanjem Re broja asimptotski približava nekoj vrednosti nakon koje povećanje protoka nema uticaja na smanjenje prljanja. Dakle, i povećanje protoka (Re broja) iznad neke vrednosti vodi ka povećanju prljanja u porama, odnosno nepovratnog prljanja, koji tada postaje dominantni otpor prenosu mase.



Slika 5. Promena udela površinskog prljanja sa promenom TMP.

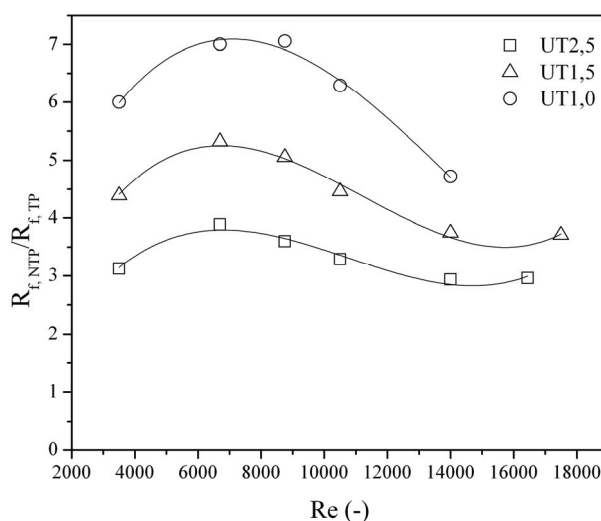
Figure 5. Influence of TMP on the ratio of reversible resistance to fouling resistance.



Slika 6. Zavisnost otpora prljanja od Re broja za TMP od 50 kPa.
Figure 6. Fouling resistance versus Re number for TMP 50 kPa.

Značajno je istaći da je za postizanje istog otpora bez promotora i sa promotorom neophodno primeniti nekoliko puta veći protok u radu bez promotora nego sa njim. Primena većih protoka i pritisaka je naročito nepoželjna kod filtracije osetljivih prirodnih materija koje bi se u tom slučaju mogle denaturisati.

Radi dodatne potvrde efikasnosti promotora u vidu uvrnute trake izračunati su i odnosi R_f , bez promotora i R_f , sa promotorom i prikazani u funkciji Re broja (slika 7). Za ispitivani opseg Re broja promotori turbulencije značajno smanjuju prljanje, preko tri puta. Na slici 7 se može zapaziti optimalni Re broj pri kome se postiže maksimalno smanjenje prljanja membrane, čak do sedam puta u slučaju UT1,0. Maksimum se pojavljuje i u slučaju druga dva promotora, ali sa smanjenjem prljanja od oko pet i tri puta za promotor UT1,5 i UT2,5, redom. Maksimumi su posledice primene promotora koji



Slika 7. Promena odnosa $R_{f,NTP}/R_{f,TP}$ sa Re brojem.
Figure 7. Ratio $R_{f,NTP}/R_{f,TP}$ versus Re number.

upravo na nižim protocima dovode do povećanja turbulencije, dok su razlike u veličini maksimuma posledica razlike u gustini zavoja trake, odnosno intenziteta turbulencije.

ZAKLJUČAK

Radi smanjenja prljanja u keramičkom cevnom membranu postavljeni su promotori turbulencije u obliku uvrnute trake različitog odnosa dužine helikoidnog elementa i prečnika promotora. Ispitivanja su pokazala da uvrnute trake, kao promotori turbulencije jednostavne helikoidne geometrije, poboljšavaju mešanje u graničnom sloju na površini membrane čime se pospešuje odnošenje proteina iz graničnog sloja. Ispitivanjem mikrofiltracije obranog mleka pokazano je da se prljanje značajno smanjuje, i do sedam puta, odabirom odgovarajućeg odnosa dužine helikoidnog elementa i prečnika uvrnute trake. Takođe se značajno smanjenje prljanja postiže primenom malih brzina proticanja i niskih transmembranskih pritisaka. Najveće smanjenje prljanja je postignuto upotrebom promotora karakteristične veličine 1,0, koja obezbeđuje najveću turbulenciju pri malim brzinama proticanja, najdužu putanju strujnica i najintenzivnije odnošenje proteina sa površine membrane.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci Ministarstvu prosvete i nauke Republike Srbije u okviru međunarodnog projekta br. E15406.

LITERATURA

- [1] G. Gésan-Guizou, Membrane processes in the dairy industry, NanoMemCourse on Nanostructured Materials and Membranes for Food Processing, Cetraro, ITM-CNR, 2010.
- [2] N.D. Lawrence, S.E. Kentish, A.J. O'Connor, A.R. Barber, G.W. Stevens, Microfiltration of skim milk using polymeric membranes for casein concentrate manufacture, *Sep. Purif. Technol.* **60** (2008) 237–244.
- [3] A.J.E. Jimenez-Lopez, N. Leconte, O. Dehainault, C. Geneste, L. Fromont, G. Gesan-Guizou, Role of milk constituents on critical conditions and deposit structure in skimmilk microfiltration (0.1 μm), *Sep. Purif. Technol.* **61** (2007) 33–43.
- [4] G. Gésan-Guizou, E. Boyaval, G. Daufin, Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition, *J. Membrane Sci.* **158** (1999) 211–222.
- [5] S.S. Popović, S.D. Milanović, M. Iličić, M.S. Djurić, M.N. Tekić, Flux recovery of tubular ceramic membranes fouled with whey proteins, *Desalination* **249** (2009) 293–300.
- [6] M.Đ. Carić, S.D. Milanović, D.M. Krstić, M.N. Tekić, Fouling of inorganic membranes by adsorption of whey proteins, *J. Membrane Sci.* **165** (2000) 83–88.
- [7] C. Ho, A. L. Zydney, Protein fouling of asymmetric and composite microfiltration membranes, *Ind. Eng. Chem. Res.* **40** (2001) 1412–1421.
- [8] C. Velasco, M. Ouammou, J.I. Calvo, A. Hernández, Protein fouling in microfiltration: deposition mechanism as a function of pressure for different pH, *J. Colloid. Interf. Sci.* **266** (2003) 148–152.
- [9] J. Balster, D.F. Stamatialis, M. Wessling, Membrane with integrated spacer, *J. Membrane Sci.* **360** (2010) 185–189.
- [10] H.M. Kyllönen, P. Pirkonen, M. Nyström, Membrane filtration enhanced by ultrasound: A review, *Desalination* **181** (2005) 319–335.
- [11] S. Muthukumaran, S.E. Kentish, M. Ashokkumar, G.W. Stevens, Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration, *J. Membrane Sci.* **258** (2005) 106–114.
- [12] P. Dejmeq, B. Funeteg, B. Hallstöm, L. Winge, Turbulence promoters in ultrafiltration of whey protein concentrate, *J. Food Sci.* **39** (1974) 1014–1017.
- [13] N. Hilal, O.O. Ogunbiyi, N.J. Miles, Experimental investigation on the separation of bentonite using ceramic membranes: Effect of turbulence promoters, *Separ. Sci. Technol.* **43** (2008) 286–309.
- [14] D.M. Krstić, M.N. Tekić, M.Đ. Carić, S.D. Milanović, Kenics static mixer as turbulence promoter in cross-flow microfiltration of skim milk, *Separ. Sci. Technol.* **38** (2003) 1549–1560.
- [15] D.M. Krstić, M.N. Tekić, M.Đ. Carić, S.D. Milanović, The effect of turbulence promoter on cross-flow microfiltration of skim milk, *J. Membrane Sci.* **208** (2002) 303–314.
- [16] S. Pal, R. Bharihoke, S. Chakraborty, S.K. Ghatak, S. De, S. DasGupta, An experimental and theoretical analysis of turbulence promoter assisted ultrafiltration of synthetic fruit juice, *Sep. Purif. Technol.* **62** (2008) 659–667.
- [17] B.B. Gupta, J.A. Howell, D. Wu, R.W. Field, A helical baffle for cross-flow microfiltration, *J. Membrane Sci.* **99** (1995) 31–42.
- [18] V. Mavrov, N.D. Nikolov, M.A. Islam, J.D. Nikolova, An investigation on the configuration of inserts in tubular ultrafiltration module to control concentration polarization, *J. Membrane Sci.* **75** (1992) 197–201.
- [19] B.J. Bellhouse, G. Costigan, K. Abhinava, A. Merry, The performance of helical screw-thread inserts in tubular membranes, *Sep. Purif. Technol.* **22–23** (2001) 89–113.
- [20] A. Jokić, Z. Zavargo, Z. Šereš, M. Tekić, The effect of turbulence promoter on cross-flow microfiltration of yeast suspensions: A response surface methodology approach, *J. Membrane Sci.* **350** (2010) 269–278.
- [21] D.M. Krstić, M.N. Tekić, M. Carić, S.D. Milanović, The effect of turbulence promoter on cross-flow microfiltration of skim milk, *J. Membrane Sci.* **208** (2002) 303–314.
- [22] A.D. Marshall, P.A. Munro, G. Trägårdh, The effect of protein fouling in microfiltration and ultrafiltration on permeate flux, protein retention and selectivity: A literature review, *Desalination* **91** (1993) 65–108.
- [23] A. Kumara, B.N. Prasad, Investigation of twisted tape inserted solar water heaters-heat transfer, friction fac-

- tor and thermal performance results, *Renew. Energ.* **19** (2000) 379–398.
- [24] P. Sivashanmugam, S. Suresh, Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **31** (2007) 301–308.
- [25] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong, Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert, *Int. Commun. Heat Mass* **36** (2009) 365–371.
- [26] Z.-M. Lin, D.-L. Sun, L.-B. Wang, The relationship between absolute vorticity flux along the main flow and convection heat transfer in a tube inserting a twisted tape, *Heat Mass Transfer* **45** (2009) 1351–1363.
- [27] T. Sugimoto, H. Kobayashi, T. Ishikawa, T. Kamiya, T. Nitsui, H. Inoue, Ultrafiltration performance of tubular membrane modules fitted with turbulent promoter: Twisted tape and static mixer, *Kagaku Kogaku Ronbun.* **22** (1996) 42–48.
- [28] P. Savello, M. Carić, R. Mahmoud, Fouling of ceramic membrane by milk proteins during microfiltration, *Aust. J. Dairy Technol.* **52** (1997) 60–62.

SUMMARY

INFLUENCE OF TWISTED TAPE TURBULENCE PROMOTER ON FOULING REDUCTION IN MICROFILTRATION OF MILK PROTEINS

Svetlana S. Popović, Dragica Z. Jovičević, Mirjana S. Đurić, Spasenija D. Milanović, Miodrag N. Tekić

Faculty of Technology, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia

(Scientific paper)

Membrane filtration has become one of the major technologies in the food industry. It is widely applied in the dairy industry, and it is mostly used for the concentration and fractionation of milk proteins and for the whey processing. Of all pressure driven membrane processes, ultrafiltration is the most widely used. The major disadvantage of pressure driven membrane processes is severe fouling of the membrane during filtration particularly when fluids containing proteins are processed. Fouling with proteins is a complex phenomenon because it occurs at the membrane surface as well as in the pores of the membrane, and depends on the operating conditions and on the interactions of proteins and membrane material. In order to reduce fouling of the membrane different techniques have been developed, and one of them relies on the changing of the hydrodynamic conditions in the membrane or module. In this study, the influence of twisted tape turbulence promoters on the fouling reduction in cross-flow microfiltration of skim milk was investigated. Twisted tapes with tree characteristic ratios of helix element length to the tape diameter (aspect ratio) were studied. It was shown that twisted tapes with different aspect ratios reduce fouling of membrane by a factor of three or more. The presence of twisted tape induces changes in the flow patterns from straight to helicoidally thus producing turbulence flow at the lower cross-flow rates. Turbulence intensification prevents accumulation of proteins at membrane surface enabling reduction in reversible fouling what results in the reduction of overall membrane fouling. The best performance was achieved using a twisted tape with the lowest aspect ratio of 1.0. This promoter reduces fouling seven times at low transmembrane pressure and low cross-flow velocity. The twisted tape with aspect ratio 1.0 induces the most intensive turbulence, the longest helicoidal flow path, and appearance of vortices near the membrane surfaces, so the scouring of proteins from the membrane surface is the most intensive in that case.

Keywords: Turbulence promoters • Microfiltration • Membrane fouling • Milk proteins