

Izbor modula i proračun tehničkih uvjeta rada membranskog uređaja za preradu površinske u pitku vodu

KUI 12/2003
Prispjelo 29. ožujka 2002.
Prihvaćeno 20. rujna 2002.

K. Košutić i B. Kunst

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu,
Marulićev trg 20, 10 000 Zagreb

U radu je prikazan pristup odabiru modula i proračunu tehničkih uvjeta rada membranskog uređaja za preradu površinske u pitku vodu. Tražen je tehnički optimalan membranski postupak smanjenja koncentracije prirodnih organskih tvari i tvrdoće vode. Između dva reverzno-osmotska i dva nanofiltracijska modula odabrana je kombinacija nanofiltracijskih modula s višim faktorom zadržavanja onečišćenja u 1. stupnju procesa i nanofiltracijskih modula s nižim stupnjem zadržavanja kalcija u 2. stupnju procesa. Materijalne bilance procesa pokazale su da se optimalni rezultat u pogledu koncentracije relevantnih sastojaka vode i iskorištenja ulazne vode postiže dvostupanjskim postupkom s optokom retentata 1. stupnja procesa.

Ključne riječi: *Reverzna osmoza, nanofiltracija, membranski moduli, proračun tehničkih uvjeta, obradba površinske vode, dobivanje pitke vode*

Uvod

Povećane potrebe za kvalitetnom pitkom vodom sve je teže udovoljiti raspoloživim izvorima podzemne ili površinske vode, pogotovo kad se prirodne vode sve više onečišćuju štetnim sastojcima najčešće pesticidima i petrokemikalijama. Kako se utvrdilo da i prirodne organske tvari iz vode pri dezinfekciji kloriranjem daju opasne klorirane organske spojeve, trihalometane, obrada voda namijenjenih piću postala je pravilom.

Postupci obrade voda moraju udovoljiti sve težim zahtjevima, pa se uz nekadašnju minimalnu obradu prirodnih voda filtriranjem i dezinfekcijom danas u pravilu rabe složeni postupci obrade poput koagulacije s flokulacijom, ionske izmjene, oksidacije i dr. Uvode se i nove suvremene metode obrade voda kao što su tlačni membranski postupci, kojima se uz obradu slanah i bočatih voda (desalinacija) sve češće čiste površinske i podzemne vode namijenjene piću. Od znanih tlačnih membranskih postupaka potpuno je uvedena reverzna osmoza, a posljednjih godina za obradbu površinskih i podzemnih voda radi dobivanja pitke vode počinje se rabiti i nanofiltracija, koja se pojavila 1970.-ih godina na Floridi, dok ultrafiltracija i mikrofiltracija uglavnom služe za uklanjanje dispergiranih tvari.¹

Zajednička značajka reverzne osmoze i nanofiltracije jest da se, uz uklanjanje soli odnosno anorganskih iona, dobro odabranim membranama mogu zadržati, manje ili više, sve vrste otopljenih molekula, dakle i prirodne i sintetske organske tvari kao i mikrobiološka onečišćenja. Dok se reverznom osmozom, zahvaljujući porama manjima od 1 nm i tlakovima od 15–60 bara, voda odvaja od gotovo svih otopljenih molekula (iona), pri nanofiltraciji rabe se membrane većih pora, dimenzija 0,7–10 nm, a radni tla-

kovi ne prelaze 10 bara. Pri takvim uvjetima iz vode se pretežito uklanjaju viševalentni ioni, Ca^{2+} i Mg^{2+} (tvrdoća vode) i prirodne organske tvari, dok jednovalentni ioni (Na^+ , K^+ , Cl^-) dijelom prolaze kroz membranu.

Nanofiltracija je dakle logičan tehnološki izbor za obradu površinskih voda stajačica (jezera i umjetnih akumulacija), pri čemu se uz tvrdoću vode bitno smanjuje i sadržaj prirodnih organskih (humusnih) otopljenih tvari. Učinkovitost nanofiltracije za čišćenje pitkih voda ilustrirana je u istraživačkim i poluindustrijskim studijama,^{2–6} koje su pokazale da uspjeh poglavito ovisi o pravilnom odabiru membranskih modula, kao i tehničkih uvjeta rada membranskih uređaja. Module i tehničke uvjete rada uređaja u praksi bira i daje korisniku isporučitelj uređaja, koji ih je odabrao i proračunao primjenjujući svoje programske (javnosti obično nedostupne) pakete.

Stoga je cilj ovog rada da se prikažu naša iskustva i pristup odabiru membranskih modula, razmatranju tehničkih uvjeta i proračunu uređaja za membransko pročišćavanje površinske (akumulacijske) u pitku vodu. Svrha membranskog postupka u ovom slučaju bilo je uklanjanje ili znatno smanjenje koncentracije dvaju sastojaka vode, organskih tvari i viševalentnih soli (iona), koje čine tvrdoću vode. Kako se radi o dvije grupe sastojaka koje se pri membranskoj obradi mogu različito ponašati, odabir membranskih elemenata i uvjeta procesa vrijedni su detaljnijeg razmatranja.

Raspoloživa površinska voda

Predviđeno je da budući membranski uređaj za obradbu akumulirane površinske vode ima kapacitet od 5 000 m³ pitke vode dnevno.

Za kvalitetu sirove akumulirane vode koju treba membranski obraditi tipični su sljedeći podatci:⁷

1) koncentracija otopljenih organskih tvari (*dissolved organic carbon*) $\gamma_{\text{DOC}} = 7 \text{ mg L}^{-1}$, što približno odgovara u nas uobičajenom podatku o kemijskoj potrošnji kisika, utrošku KMnO_4 potrebnog za oksidaciju organskih tvari od $20 \text{ mg L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ ili $5 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$

2) ukupna tvrdoća vode od $140 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$ odnosno $357 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, što pokazuje da se radi o dosta tvrdj vodi sklonoj taloženju kamenca u distribucijskim uređajima.

Postupkom dobivena pitka voda treba odgovarati normama svjetske zdravstvene organizacije odnosno Pravilniku o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće Republike Hrvatske.⁸ Po tom Pravilniku maksimalno dopuštena masena koncentracija (MDK) navedenih dvaju sastojaka vode iznosi:

utrošak $\text{KMnO}_4 - 3 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$, (što približno odgovara $\gamma_{\text{DOC}} = 4,2 \text{ mg L}^{-1}$)

ukupna tvrdoća – min $60 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$.

Membranskim se postupkom obradbe mora dakle znatno smanjiti koncentracija otopljenih organskih tvari (γ_{DOC}) uz istodobno smanjenje tvrdoće vode otprilike na polovinu.

Uz smanjenje koncentracije nepoželjnih sastojaka pri membranskoj obradi nužno je postići visoko iskorištenje ulazne vode. S jedne strane zato što je količina raspoložive vode u akumulacijama ljeti bitno smanjena, pa dragocjenu vodu valja što bolje iskoristiti, a s druge strane veće iskorištenje sirove vode smanjuje masu retentata koji se odbacuju. Iskorištenje vode u procesu je stoga važan čimbenik i pri odabiru modula i pri proračunu tehničkih uvjeta rada uređaja.

Odabir membranskih modula (elemenata)

Za membransku obradu svake vode bira se, ovisno o količini i kvaliteti ulazne vode, prikladan membranski modul. Iz tehničkih podataka membranskih modula proračunom se tada određuje približni broj membranskih modula i tlačnih cijevi potrebnih za obradbu tražene količine vode.

Za postizanje cilja u ovom slučaju mogu poslužiti i reverzno-osmotski (RO) i nanofiltracijski (NF) membranski moduli. U tablici 1 dani su djelomični (dio važan za postavljene zadatke) nazivni tehnički podatci za dva tipična spiralno smotana RO i dva tipična spiralno smotana NF modula.⁹

Usporedbom nazivnih podataka u tablici 1 vidi se da RO moduli imaju veći protok permeata, ali pri višim radnim tlakovima. Zbog sniženja troškova energije bolje je da uređaj radi pri nižim tlakovima, što znači da pri radnom tlaku od 7 bara protok permeata RO modula ne bi bio veći od onog NF modula, tj. svi moduli iz tablice 1 su u pogledu protoka permeata podjednako povoljni. Zadržavanje otopljenih organskih tvari (DOC) u RO modulima bit će više od onog u NF modulima, no i u potonjima je zadržavanje zadovoljavajuće, dok se u pogledu sniženja koncentracije

Tablica 1 – Nazivni tehnički podatci za dva tipična RO i dva tipična NF modula

Table 1 – The manufacturers' data for typical RO and NF modules

	RO1	RO2	NF1	NF2
$Q_p/\text{m}^3\text{d}^{-1}$	44,0	41,0	33,0	27,7
p/bar	10,2	10,2	7	5,5
R_{DOC}	0,96	0,96	0,95	0,95
R_{Ca}	0,99	0,99	0,95	0,45
Y	0,15	0,10	0,15	0,15
A/m^2	37	30,7	37	37

kalcija membrane bitno razlikuju. RO moduli gotovo u potpunosti zadržavaju kalcijeve ione, dok ih NF moduli u manjoj ili većoj mjeri propuštaju. To im je u razmatranom slučaju prednost, jer obrađena voda po hrvatskim normama ne smije biti premekana. U tablici 1 uočljivo je i niže nazivno iskorištenje ($Y = 0,10$) modula RO2, što bi tražilo veći broj takvih modula za postizanje zadovoljavajućeg iskorištenja ulazne vode.

Na temelju podataka iz tablice 1 i navedenih razmatranja slijedi da za vodu navedenih svojstava prednost imaju NF moduli, a izbor između dva tipa NF modula može se izvršiti nakon proračuna procesnih veličina i radnih uvjeta membranskog uređaja.

Račun procesnih veličina i radnih uvjeta membranskog uređaja

Membranski uređaj za obradu vode za piće sastoji se od niza membranskih jedinica, modula. Po nekoliko (6–7) modula spojeno je u tlačnoj cijevi serijski, tako da su ukupna protočnost i separacijski učinak jedne tlačne cijevi rezultat prolaza ulazne vode kroz niz modula u cijevi. Protočnost tlačne cijevi izražen protokom permeata (prerađene vode) i separacijski učinak, tj. karakteristike dobivenog permeata i retentata ovise o tipu i broju modula u cijevi, što uključuje veličinu membranske površine u modulima i hidrodinamičke uvjete rada, i proračunavaju se za jednu tlačnu cijev. Ukupna preradljivost postrojenja postiže se paralelnim spajanjem onoliko tlačnih cijevi koliko je potrebno za traženu proizvodnju. Taj modularni način gradnje membranskih uređaja ima mnoge prednosti, od jednostavnog prilagođavanja proizvodnosti prema potrebama i prema raspoloživoj količini ulazne vode, do lakog održavanja, tj. pronalaženja i zamjene neispravnih modula odnosno tlačnih cijevi.

Katkada se, kad sastav ulazne vode dopušta, zbog povećanja iskorištenja vode predviđa i proračunava dvostupnjski membranski uređaj sa stupnjevanim tokom retentata, jer se daljnjom obradbom retentata iz tlačnih cijevi 1. stupnja može dobiti dodatna količina pročišćene vode.

Budući da u obzir dolaze dva tipa NF membranskih modula, početno su razmotrene dvije varijante membranskog uređaja, jedna s modulima NF1, a druga s modulima NF2. Za svaku varijantu računaju se:

- karakteristike (protočnost i separacijski učinak) tlačne cijevi 1. stupnja procesa
- karakteristike 2. stupnja procesa.

Uređaj s modulima tipa NF 1

a) Tlačna cijev za 1. stupanj procesa

Temeljne veličine za proračun su karakteristike modula: nazivno iskorištenje ulazne vode Y , radni tlak p , faktori zadržavanja otopljenih tvari R i protok permeata Q_p te svojstva ulazne vode: masena koncentracija sastojaka koje treba ukloniti ili im sniziti koncentraciju.

Nazivno iskorištenje za razmotrene nanofiltracijske module iznosi $Y = 0,15$, što vrijedi za uvjete pri kojima su moduli ispitani. Ti uvjeti (koncentracija ulazne vode i radni tlak) mijenjaju se u tlačnoj cijevi od modula do modula zbog povećanja koncentracije ulazne vode u svaki od modula spojenog u seriju i blagog pada radnog tlaka u svakom modulu.

Protok permeata u svakom modulu izračunava se iz pogske sile membranskog procesa, efektivnog tlaka na membrani, određenog razlikom radnog i osmotskog tlaka u tankom sloju fluida iznad membrane:

$$p_{ef} = (p - \pi)$$

gdje je:

p = radni tlak u modulu, a

π = osmotski tlak u tankom sloju vode iznad membrane.

Povećanjem masene koncentracije ulazne vode od modula do modula i padom tlaka u svakom modulu blago se smanjuje iskorištenje Y od prvog do zadnjeg modula. Pri proračunu tlačne cijevi u kojoj je smješteno 6–7 serijski spojenih modula potreban je i podatak o faktoru separacije same membrane, R , koji se prema podacima iz deklaracije proizvođača za navedene uvjete praktički ne mijenja od prvog do zadnjeg modula u tlačnoj cijevi.

U proračunu se za tlačnu cijev sa 7 serijski spojenih modula shematski prikazanu na slici 1 uz protočnost tlačne cijevi računa¹⁰ i smanjenje koncentracije otopljenih organskih tvari (DOC) i smanjenje kalcijске tvrdoće u permeatu. Izra-

čunate karakteristike rada tlačne cijevi, tj. protoci ulazne vode, retentata i permeata te koncentracije tvari u ulaznoj vodi, retentatu i permeatu za svaki su modul u tlačnoj cijevi ilustrirani u tablicama 2a i 2b.

Budući da se koncentracije permeata iz pojedinih modula razlikuju, prosječne koncentracije otopljenih organskih tvari i kalcijске tvrdoće izračunate su u spojenom permeatu iz svih modula tlačne cijevi. Dobivene su sljedeće vrijednosti:

$$\gamma_{p,DOC} = 0,56 \text{ mg L}^{-1} \text{ DOC}$$

$$c_{p,Ca} = 11,3 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca.}$$

Ti podatci pokazuju da je koncentracija otopljenih tvari u permeatu tlačne cijevi vrlo niska (ispod zahtjeva hrvatskih normi), što govori o dobrom učinku separacijskog procesa.

S druge strane iz dobivenih podataka izračunato iskorištenje ulazne vode iznosi:

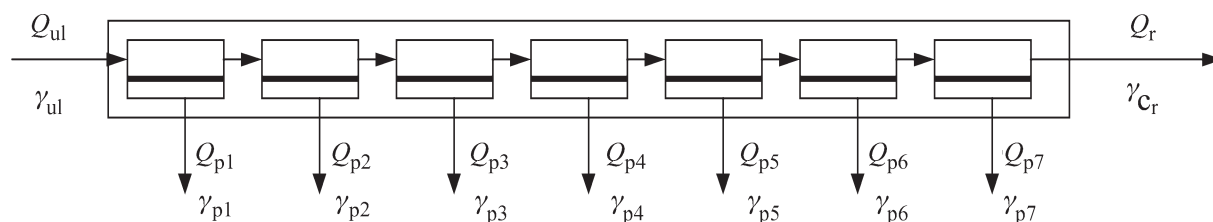
$$Y = \frac{Q_p}{Q_{ul}} = \frac{146}{220} = 0,664,$$

Tablica 2a – Proračun protoka u tlačnoj cijevi sa sedam modula tipa NF1 za 1. stupanj uređaja. Radni tlak 7 bara, $Q_p = 33,0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, $R = 0,95$.

Table 2a – Calculation of fluxes in the pressure vessel of the 1. stage of the process containing seven NF1 modules. $p = 7 \text{ bar}$, $Q_p = 33.0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, $R = 0.95$.

Modul Module	$Q_{ul}/\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$	Y	$Q_r/\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$	$Q_p/\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$
1	220,0	0,15	187,0	33,0
2	187,0	0,15	159,0	28,0
3	159,0	0,15	135,2	23,8
4	135,2	0,14	116,3	18,9
5	116,3	0,14	100,0	16,3
6	100,0	0,14	86,0	14,0
7	86,0	0,14	74,0	12,0

$$\Sigma Q_p = 146,0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$



Slika 1 – Tlačna cijev sa serijski spojenim modulima

Fig. 1 – Pressure vessel with the modules in series

Tablica 2b – Proračun koncentracija u tlačnoj cijevi sa sedam modula tipa NF1 za 1. stupanj uređaja. Radni tlak 7 bara, $\gamma_{ul,DOC} = 7 \text{ mg L}^{-1}$, $\gamma_{ul,Ca} = 140 \text{ mg L}^{-1}$, $R = 0,95$.

Table 2b – Calculation of concentrations in the pressure vessel of the 1. stage of the process containing seven NF1 modules. $p = 7 \text{ bar}$, $\gamma_{ul,DOC} = 7 \text{ mg L}^{-1}$, $\gamma_{ul,Ca} = 140 \text{ mg L}^{-1}$, $R = 0.95$

Modul Module	$\gamma_{ul,DOC}$ mg L ⁻¹	$\gamma_{r,DOC}$ mg L ⁻¹	$\gamma_{p,DOC}$ mg L ⁻¹	$\gamma_{ul,Ca}$ mg L ⁻¹ Ca	$\gamma_{r,Ca}$ mg L ⁻¹ Ca	$\gamma_{p,Ca}$ mg L ⁻¹ Ca
1	7	8,17	0,38	140	163,6	7,6
2	8,17	9,53	0,44	163,6	190,9	8,8
3	9,53	11,12	0,51	190,9	222,8	10,3
4	11,12	12,83	0,60	222,8	260,0	12,0
5	12,83	14,81	0,69	260,0	300,0	13,9
6	14,81	17,09	0,79	300,0	346,3	16,1
7	17,09	19,72	0,92	346,3	399,6	18,6

što bi značilo da bi se trećina mase ulazne vode odbacila. Nezadovoljavajuće iskorištenje proizlazi iz svojstava modula i može se poboljšati uvođenjem 2. stupnja procesa.

b) 2. stupanj procesa

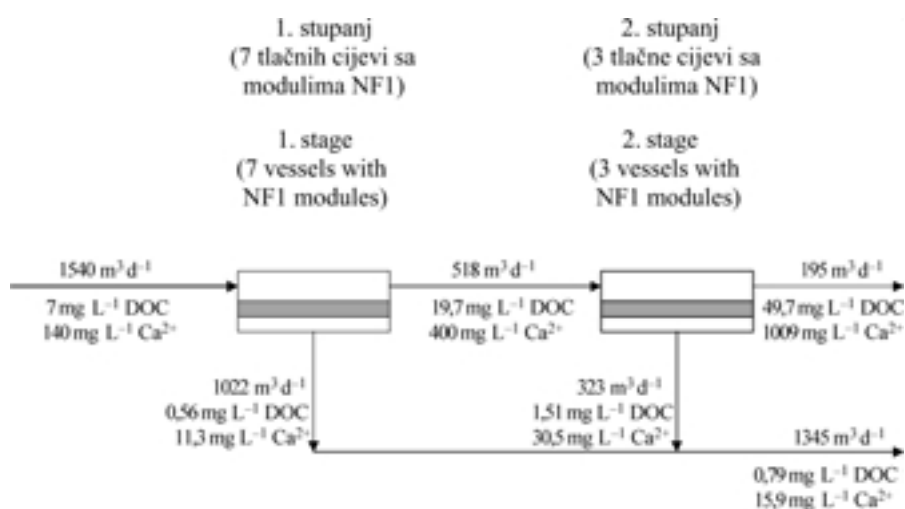
Povećanje iskorištenja ulazne vode uvođenjem 2. stupnja procesa sa stupnjevanim tokom retentata postiže se daljnjom obradom retentata iz tlačne cijevi 1. stupnja, čime se može dobiti dodatna količina pročišćene vode. To je i energetski povoljno jer se retentat na izlazu iz tlačne cijevi 1. stupnja procesa nalazi pod povišenim tlakom, ima dakle potrebnu tlačnu energiju za daljnju membransku separaciju. Odbacivanjem retentata (u kanalizaciju) nepažljivo bi

odbacili i dio još iskoristive energije. Uvođenjem 2. stupnja procesa štediti se dakle i tlačna energija, tj. smanjuju se proizvodni troškovi. To međutim zahtijeva dodatne membranske module, dakle izvjesno povećanje investicijskih ulaganja. Dodatno, pri radu 2. stupnja postrojenja nužno je voditi računa o povećanju koncentracije retentata da ne bi došlo do taloženja teško topljivih soli na membranama. U ekonomskim razmatranjima uvijek treba utvrditi prednosti i nedostatke uvođenja 2. stupnja procesa i odabrati optimalno rješenje.

Tehnički uvjeti rada za 2. stupanj procesa ovise o veličinama rada 1. stupnja. Kako je tlak ulazne vode u tlačne cijevi 1. stupnja procesa iznosio 7 bara, prolazom kroz serijski spojene module u tlačnoj cijevi zbog hidrodinamičkih je razloga došlo do neizbježivog pada tlaka u svakom od modula. Prosječni pad tlaka u modulu pri tlaku od 7 bara ne iznosi više od 0,25 bara pa ukupni pad tlaka u tlačnoj cijevi sa sedam modula neće biti veći od 2 bara. Izlazni retentat bit će dakle pod tlakom od oko $7 - 2 = 5$ bara, pa proračun 2. stupnja polazi od tog radnog tlaka. Tlaku od 5 bara i dalje odgovara faktor zadržavanja organskih tvari i kalcijeve tvrdoće od $R = 0,95$. Ulazne masene koncentracije otopljenih organskih tvari i kalcijevih iona u tom stupnju jednake su izlaznim koncentracijama retentata iz 1. stupnja tj. iznose $\gamma_{ul,DOC} = 19,7 \text{ mg L}^{-1}$ odnosno $\gamma_{ul,Ca} = 400 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$. Na temelju tih polaznih podataka napravljen je proračun 2. stupnja procesa na isti način kao već ilustrirani proračun 1. stupnja.

Proračun pokazuje da će se u jednoj tlačnoj cijevi 2. stupnja sa sedam membranskih elemenata preraditi $172,7 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ulazne vode (retentata 1. stupnja), pri čemu se dobiva dodatnih $107,6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ pitke vode, dok ostatak od $65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ izlazi iz tlačne cijevi kao završni retentat. Sažeti rezultati proračuna nalaze se u bilanci materijala za dvostupanjsko postrojenje s modulima tipa NF1 koja je prikazana na slici 2.

Na slici 2 vidi se da prosječna koncentracija otopljenih organskih tvari i Ca tvrdoće u spojenom permeatu svih sedam modula 2. stupnja iznosi:



Slika 2 – Ulazni i izlazni protoci tvari te masene koncentracije komponenata u dvostupanjskom membranskom uređaju s modulima tipa NF1

Fig. 2 – Flow rate and component concentrations in the the two-stage membrane plant with NF1 modules

$$\gamma_{p,DOC} = 1,51 \text{ mg L}^{-1}$$

$$\gamma_{p,Ca} = 30,5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$$

dakle da i permeat 2. stupnja procesa ima više nego zadovoljavajuću nisku koncentraciju organske tvari, kao i nisku koncentraciju kalcija.

Pri uvođenju 2. stupnja procesa sa stupnjevanim tokom retentata nužno je prilagoditi protočnost tlačnih cijevi 1. i 2. stupnja, tj. povezati količinu izlaznog retentata iz 1. stupnja procesa s ulaznom količinom vode koju može prihvatiti tlačna cijev 2. stupnja. Ovdje se to postiže omjerom 7 : 3, tj. 3 tlačne cijevi 2. stupnja bit će dovoljne da prihvate retentat iz 7 tlačnih cijevi 1. stupnja.

Iz podataka na slici 2 vidi se da ukupno iskorištenje dvostupanjskog uređaja iznosi:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_{ul}} = \frac{1345}{1540} = 0,873,$$

što je zadovoljavajuće visok učinak jer retentat koji se odbacuje čini svega 12,7 % od ukupne mase ulazne vode.

Bilanca materijala pokazuje da je zadržavanje onečišćenja u nanofiltracijskom membranskom postrojenju vrlo dobro, koncentracije organskih tvari i kalcija u dobivenom permeatu vrlo su niske. Kalcijaska tvrdoća je za pitku vodu čak i preniska (Pravilnik traži minimum $60 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$), no to se može lako popraviti ili primješavanjem odgovarajuće količine neobrađene (ali filtrirane u multimedijском filteru) vode ili otvrdnjavanjem vode dodatkom vapnenog mlijeka, što se u praksi često radi.

Uređaj s modulima tipa NF2

Radni uvjeti uređaja s ovim modulima računaju se na isti način kao u prvoj varijanti, jedino treba imati na umu da je za ove module tipično da je faktor zadržavanja organskih

tvari različit od onoga za kalcijsku tvrdoću, pa se to pri proračunu mora uzeti u obzir.

Računom dobiveni rezultati ilustrirani su na slici 3 materijalnom bilancom dvostupanjskog postrojenja s modulima tipa NF2. U ovom slučaju prilagodba kapaciteta tlačnih cijevi 1. i 2. stupnja pokazala je da 9 tlačnih cijevi 1. stupnja opskrbljuje retentatom 4 tlačne cijevi 2. stupnja, odnosno da će poredak tlačnih cijevi u 1. i 2. stupnju biti 9:4.

Podaci na slici 3 pokazuju da je ukupno iskorištenje ulazne vode i u ovom dvostupanjskom postrojenju jednaka onoj proračunatoj u prvom slučaju:

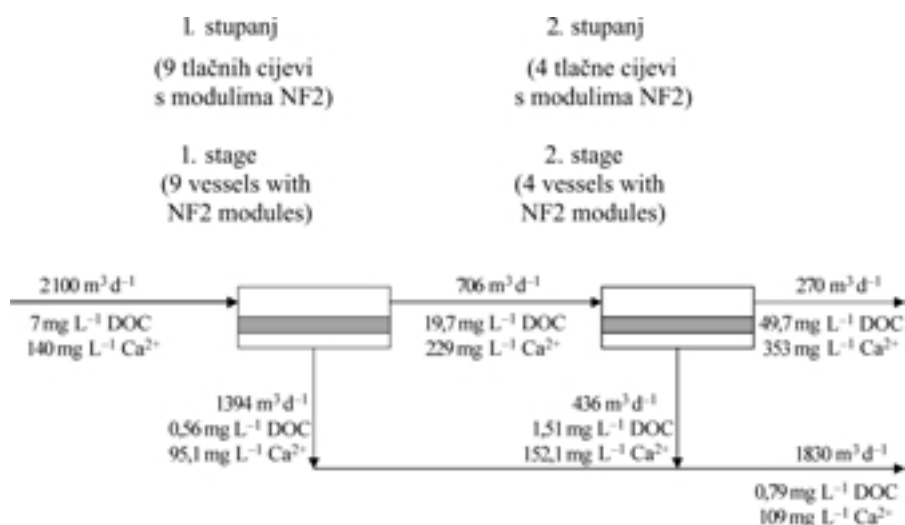
$$Y = \frac{Q_p}{Q_{ul}} = \frac{1830}{2100} = 0,871.$$

Iz bilance materijala se vidi da je zadržavanje organskih tvari na nanofiltracijskim modulima NF2 isto kao i s modulima NF1 zadovoljavajuće visoko. S druge strane kalcijaska tvrdoća dobivenog permeata znatno je viša nego u prvoj varijanti. Iznosom od $109 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$ ona doduše zadovoljava uvjete Pravilnika (minimum $60 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$), no takva koncentracija kalcija za pitku vodu prilično je visoka i znatno premašuje normirani iznos. To znači da nanofiltracijska obrada vode modulima NF2 neće biti pravo rješenje.

Uređaj s kombinacijom modula: NF1 u 1. stupnju i NF2 u 2. stupnju

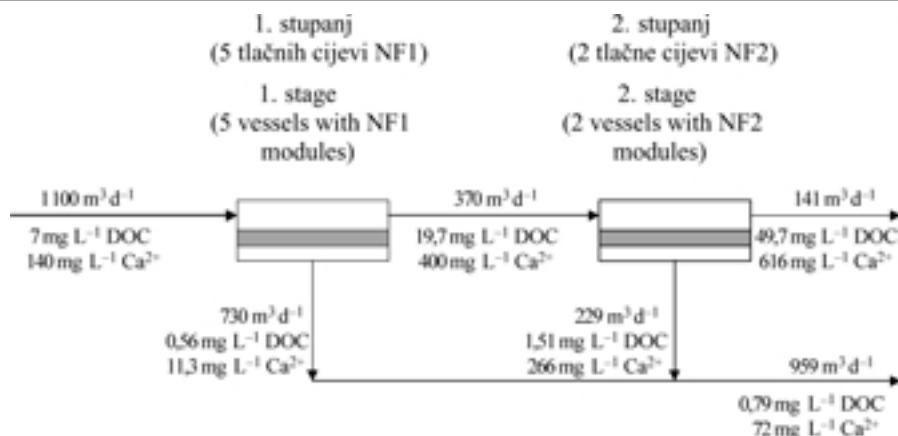
Budući da je upotrebom modula NF1 u prvoj varijanti proizvedena voda preniske kalcijske tvrdoće, a upotrebom modula NF2 u drugoj varijanti dobivena voda s nešto previsokom koncentracijom kalcija, proračunata je i treća mogućnost s modulima tipa NF1 u 1. stupnju uređaja i modulima NF2 u drugom stupnju. Takvom kombinacijom dobiven je bolji rezultat nego u prve dvije varijante. Ilustriran je materijalnom bilancom na slici 4.

Prilagodbom protočnosti tlačnih cijevi 1. i 2. stupnja dobiven je omjer broja tlačnih cijevi koji u ovom slučaju iznosi 5:2.



Slika 3 – Ulazni i izlazni protoci tvari te masene koncentracije komponenata u dvostupanjskom membranskom uređaju s modulima tipa NF2

Fig. 3 – Flow rate and component concentrations in the the two-stage membrane plant with NF2 modules



Slika 4 – Ulazni i izlazni protoci tvari te masene koncentracije komponenata u dvostupanjskom membranskom uređaju s modulima tipa NF1 u 1. stupnju i modulima tipa NF2 u 2. stupnju postrojenja

Fig. 4 – Flow rate and component mass concentrations in the two-stage membrane plant with NF1 modules in the 1. stage and NF2 modules in the 2. stage

Iskorištenje ulazne vode Y ostalo je isto:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_{ul}} = \frac{959}{1100} = 0,872,$$

dok je većom koncentracijom kalcija u 1. stupnju procesa i njegovim slabijim zadržavanjem u modulima 2. stupnja dobiven zajednički permeat tlačnih cijevi 1. i 2. stupnja, koji uz dobro uklonjene organske tvari ima i zadovoljavajuću koncentraciju kalcija.

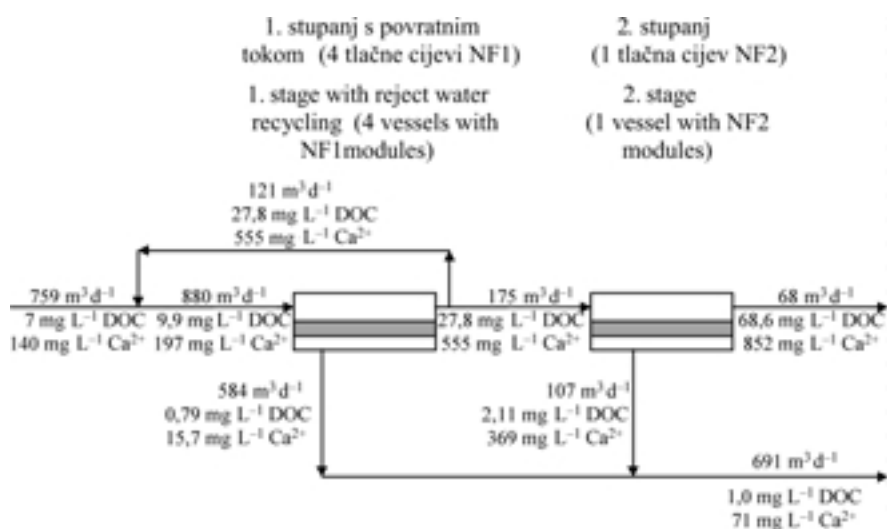
Uređaj s modulima kao pod 3. te s povratnim tokom dijela retentata 1. stupnja

Iako je u sve tri proračunate varijante dvostupanjskog uređaja dobivena prilično visoka pretvorba ulazne vode od oko 87 %, uputno ju je, kad se to može, još povećati povratnim tokom dijela retentata (*reject water recycling*) iz 1. stupnja

procesu. To se postiže spajanjem shematski prikazanim na slici 5, koja ujedno ilustrira materijalnu bilancu procesa.

Povratni tok dijela retentata 1. stupnja ima smisla kada se radi o ulaznoj vodi s relativno niskim koncentracijama sastojaka koje treba ukloniti, što je ovdje slučaj, jer se tada njihova koncentracija povratnim tokom dijela koncentrata može povećati bez negativnih utjecaja na separacijski učinak tlačne cijevi. Na taj se način iz retentata "izvlači" još dio pitke vode, a bez povećanih investicijskih troškova.

Budući da se povratnim tokom dijela koncentrata malo povećava koncentracija ulazne vode u 1. stupanj procesa, mijenjaju se (ali ne bitno) i veličine rada membranskih modula. Za takav se način rada zato još jednom računaju (istom metodologijom) varijabilne veličine rada tlačne cijevi 1. i 2. stupnja da bi se na kraju dobila materijalna bilanca dvostupanjskog procesa s povratnim tokom dijela retentata 1. stupnja (slika 5).



Slika 5 – Ulazni i izlazni protoci tvari te masene koncentracije komponenata u dvostupanjskom membranskom uređaju s povratnim tokom dijela koncentrata

Fig. 5 – Flow rate and component mass concentrations in the two-stage membrane plant with the 1. stage reject water recycling

Povećano iskorištenje ulazne vode iznosi:

$$Y = \frac{691}{759} = 0,910,$$

pri čemu se ostale varijabilne veličine procesa, radni tlakovi i koncentracije otopljenih tvari u permeatu nisu bitno promijenili.

Usporedba broja modula

Budući da prema postavljenom cilju preradljivost postrojenja treba biti $5\,000\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$, proračunati uređaj treba adekvatno povećati, što s obzirom na modularni tip procesa ne mijenja ovdje proračunate odnose. Preračunavanje je u tablici 3 učinjeno za sve 4 prikazane mogućnosti kako bi se usporedbom ukupnog broja modula našle eventualne razlike koje bi mogle utjecati na visinu investicijskih troškova.

Rezultati u tablici 3 pokazuju da je broj modula u svim razmotrenim rješenjima podjednak, tj. da investicijski troškovi modula i tlačnih cijevi za optimalno rješenje neće biti veći od uobičajenih.

Zaključci

Izborom modula i proračunom uređaja za membransku preradu površinske u pitku vodu tražen je tehnički optimalan membranski postupak smanjenja koncentracije prirodnih organskih tvari i tvrdoće vode. Proračunom četiri varijante dvostupanjskog membranskog uređaja s komercijalno raspoloživim nanofiltracijskim modulima dobivene su materijalne bilance membranskog separacijskog uređaja, iz kojih proizlazi da se optimalni rezultati mogu očekivati od dvostupanjskog uređaja s modulima NF1 u 1. stupnju i modulima NF2 u 2. stupnju procesa i s povratnim tokom dijela retentata iz 1. stupnja procesa.

Prednosti takvog rješenja su:

- zadovoljavajuće visoko iskorištenje ulazne vode ($> 90\%$),
- zadovoljavajuće visoko uklanjanje otopljenih organskih tvari iz vode,
- zadovoljavajuće, u skladu sa zahtjevima hrvatskih normi, sniženje koncentracije kalcijevih iona u permeatu (na $71\text{ mg L}^{-1}\text{ Ca}$), što znači da nije potrebna završna obrada permeata dodavanjem vapnenog mlijeka,
- proračunata koncentracija kalcijevih iona u retentatu 1. stupnja ($555\text{ mg L}^{-1}\text{ Ca}$) jamči da u modulima 1. stupnja procesa neće doći do taloženja kamenca. Koncentracija kalcijevih iona u retentatu 2. stupnja procesa takva je ($852\text{ mg L}^{-1}\text{ Ca}$), da se taloženje kamenca u modulima 2. stupnja po potrebi može djelotvorno spriječiti dodavanjem inhibitora stvaranja kamenca (antiskalanta).
- približno isti ukupni broj modula kao i u ostalim mogućim rješenjima, što znači da ni investicijski troškovi takvog rješenja neće biti veći.

Popis kratica i oznaka

List of abbreviations and symbols

- A – površina membrane u modulu, m^2
– membrane module surface area, m^2
- $\gamma_{p,\text{DOC}}$ – koncentracija otopljenog organskog ugljika (DOC) u permeatu, mg L^{-1}
– concentration of dissolved organic carbon in the permeate, mg L^{-1}
- $\gamma_{p,\text{Ca}}$ – koncentracija kalcija u permeatu, mg L^{-1}
– concentration of calcium in the permeate, mg L^{-1}
- $\gamma_{r,\text{DOC}}$ – koncentracija otopljenog organskog ugljika (DOC) u retentatu, mg L^{-1}
– concentration of dissolved organic carbon in the retentate, mg L^{-1}
- $\gamma_{r,\text{Ca}}$ – koncentracija kalcija u retentatu, mg L^{-1}
– concentration of calcium in the retentate, mg L^{-1}

Tablica 3 – Broj potrebnih membranskih modula za svaku od četiri varijante membranskog procesa

Table 3 – The number of membrane modules needed for each version of the membrane process

Varijanta Version	Broj modula po shemi Number of modules				Broj modula za kapacitet $5000\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$ Number of membrane modules for capacity of $5000\text{ m}^3\text{ d}^{-1}$		
	Preradljivost Retentate flow rate $\text{m}^3\text{ d}^{-1}$	1. stupanj 1. stage	2. stupanj 2. stage	Ukupno modula Total number of modules	1. stupanj 1. stage	2. stupanj 2. stage	Ukupno modula Total number of modules
		Broj modula Number of modules	Broj modula Number of modules		Broj modula Number of modules	Broj modula Number of modules	
1	1345	$7 \times 7 = 49$	$3 \times 7 = 21$	70	182	78	260
2	1830	$9 \times 7 = 63$	$4 \times 7 = 28$	91	172	77	249
3	959	$5 \times 7 = 35$	$2 \times 7 = 14$	49	183	73	256
4	691	$4 \times 7 = 28$	$1 \times 7 = 7$	35	203	51	254

- $\gamma_{ul,DO}$ – koncentracija otopljenog organskog ugljika (DOC) u ulaznoj vodi, mg L^{-1}
– concentration of dissolved organic carbon in the feed, mg L^{-1}
- $\gamma_{ul,Ca}$ – koncentracija kalcija u ulaznoj vodi, mg L^{-1}
– concentration of calcium in the feed, mg L^{-1}
- p – radni tlak, bar
– operating pressure, bar
- p_{ef} – efektivni radni tlak, bar
– effective operating pressure, bar
- π – osmotski tlak, bar
– osmotic pressure, bar
- Q_p – protok permeata, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
– permeate flow rate, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
- Q_r – protok retentata, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
– retentate flow rate, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
- Q_{ul} – obujmni protok ulazne vode, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
– feed volume flow rate, $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
- $R_{DOC} = 1 - \gamma_{p,DOC}/\gamma_{ul,DOC}$ – faktor separacije (zadržavanja) organske tvari
– organics rejection factor
- $R_{Ca} = 1 - \gamma_{p,Ca}/\gamma_{ul,Ca}$ – faktor separacije (zadržavanja) kalcija
– Ca rejection factor
- $Y = Q_p/Q_{ul}$ – iskorištenje ulazne vode
– yield of the feed

Literatura References

1. Z. Amjad (ur.): Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993, str. 275–333.
2. F. Duran, G. W. Dunkelberger, *Desalination* **102** (1995) 27.
3. P. Fu, H. Ruiz, J. Lozier, K. Thompson, C. Spangenberg, *Desalination* **102** (1995) 47.
4. F. E. Sanders, J. C. Lozier, *Desalination* **103** (1995) 133.
5. S. Szymborski, *Desalination* **103** (1995) 147.
6. T. Thorsen, Membrane Filtration of Humic Substances, u H. Ødegaard (ur.), Removal of Humic Substances from Water, Internat. IAWQ-IWSA Conference, Trondheim, Norway, June 1999, str. 115–122.
7. Analize vode izvorišta Vela Fontana tijekom 1999., Vodovod Ponikve, Krk. Podatci Odjela za kontrolu voda Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije, Rijeka.
8. Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće, Narodne Novine CLVI, br. 46 (1994) 1569.
9. The Dow Chemical Company, FILMTEC Membranes, Form No. 609-00138-696QRP, ožujak 1996.; Form No. 609-00178-797QRP, srpanj 1997. Fluid Systems Bulletin, TFC Spiral-Wound Reverse Osmosis Element TFC 8821ULP, 1995.
10. C. W. Saltonstall, R. W. Lawrence, *Desalination* **42** (1982) 247.

SUMMARY

Selection of Membrane Elements and Calculation of Technical Characteristics of Membrane Unit for Production of Potable from Surface Water

K. Košutić and B. Kunst

The objective of this work was to show an approach to selection and calculation of technical quantities of the membrane unit for production of potable from surface water. A technically optimal membrane process to decrease the concentrations of natural organic matter and hardness of water was looked for.

Two types of nanofiltration modules were selected: the NF1 module with a high rejection factor for both the organic matter and the water hardness, and the NF2 module with a high rejection factor for the organic matter and a lower rejection of divalent ions.

The process quantities and technical characteristics of the two-stage membrane units using the first and the second selected modules, were calculated and compared. The unit using the NF1 type modules showed the satisfactory high organics rejection and too high hardness rejection (according to the Croatian standards for drinking water), along with the good permeate yield of 87 %. In case of the unit with NF2 modules the rejection of calcium was too low.

On the basis of the obtained results the combined unit having the NF1 modules in the first stage and the NF2 modules in the second stage was calculated. The results were improved, and in order to increase the permeate yield a part of the first stage retentate was recycled. The permeate yield was increased to 91 % of the feed water.

The final result was the unit that showed the following advantages:

- the satisfactory high removal of organic pollutants
- the satisfactory (according to the Croatian standards for drinking water) removal of hardness,
- the high yield of the permeate (drinking water)
- approximately the same number of modules as in the other, conventional solutions, which means that the investment costs would not be higher.