

RAZVOJ I PRIMJENA MBR TEHNOLOGIJE U PROCESU PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA

Amra SERDAREVIĆ

Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, BiH, e-mail: amra.serdarevic@gf.unsa.ba

REZIME

Sve strožiji kriteriji u pogledu zahtjeva za prečišćavanjem otpadnih voda uvjetuju brzi razvoj i primjenu tehnoloških inovacija u domenu tehnologija za prečišćavanju otpadnih voda. Barijere u primjeni su često percepcija nove tehnologije u okruženju gdje se implementira, sa svim izazovima i modernom opremom, ali i troškovi koji prate uvođenje novih tehnologija. Membranski procesi u prečišćavanju otpadnih voda spadaju u modernu tehnologiju, koja dobija značajnu ulogu u toku zadnjih desetak godina, osobito usljed sve većeg problema nedostatka pitke vode i strožijih zahtjeva u pogledu kvaliteta efluenta, te potrebe smanjenja veličine uređaja koji se sve više lociraju blizu izvora/naselja ili u samom naselju. Membranski procesi, čija primjena datira već od 1960 godine, od početka su bili praćeni izuzetno visokim kapitalnim troškovima, zbog visoke cijene membrana i prateće opreme. To je, uglavnom, bio i glavni uzrok sporijeg prihvatanja ove tehnologije kod krajnjih korisnika. Ubrzan razvoj proizvodnje membrana, istraživanja i iskustva sa uređaja u pogonu, omogućili su primjenu sve kvalitetnijih membrana, njihov duži vijek trajanja, uz znatno smanjenje cijena ukupnih troškova. U radu je prikazan razvoj i primjena MBR tehnologije sa osvrtom na dosadašnje rezultate istraživanja te sadašnji status i trend u primjeni MBR tehnologije u svijetu.

Ključne riječi: Membrane, MBR uređaji, zaprljanje membrana, fluks, permeat, transmembranski pritisci

1. UVOD

Od početka prvih istraživanja membransko bioloških reaktora (MBR), prije više od 30 godina do danas, razvijeno je nekoliko generacija MBR sistema. MBR reaktori su, uglavnom, testirani i korišteni za primjenu u prečišćavanju industrijskih otpadnih voda, otpadnih

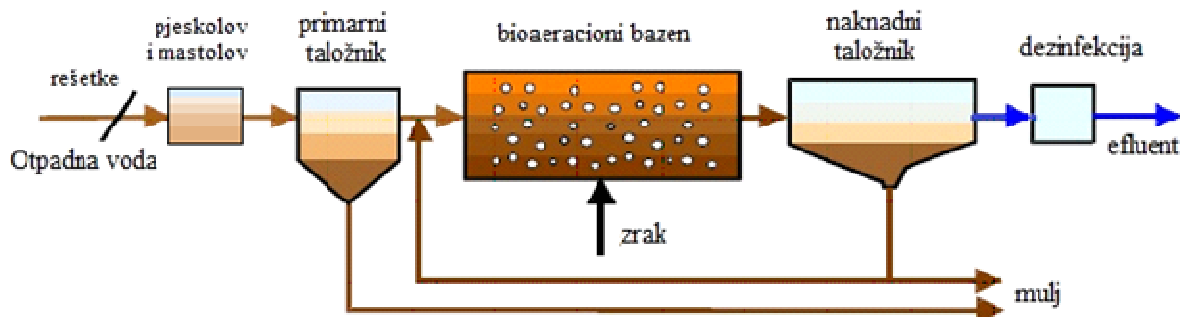
voda domaćinstava, zatim u slučajevima gdje su uvjeti na terenu ograničavajući za postavljanje većih objekata, zatim za ponovno korištenje vode ili kod strožijih uvjeta za kvalitet efluenta pri ispuštanju u prijemnik. MBR tehnologija se bazira na kombinaciji bioloških procesa prečišćavanja sa aktivnim muljem i odvajanjem biomase i drugih suspedovanih materija membranskom filtracijom.

Kao relativno nova tehnologija, MBR uređaji su često podcjenjeni u odnosu na dobro poznate konvencionalne sisteme. Unatoč takvim stavovima, koji se još uvijek provlače, MBR tehnologija postaje sve više prihvaćena, što kroz brojna istraživanja i poboljšanja MBR uređaja tako i kroz sve širu primjenu i razmjenu iskustava.

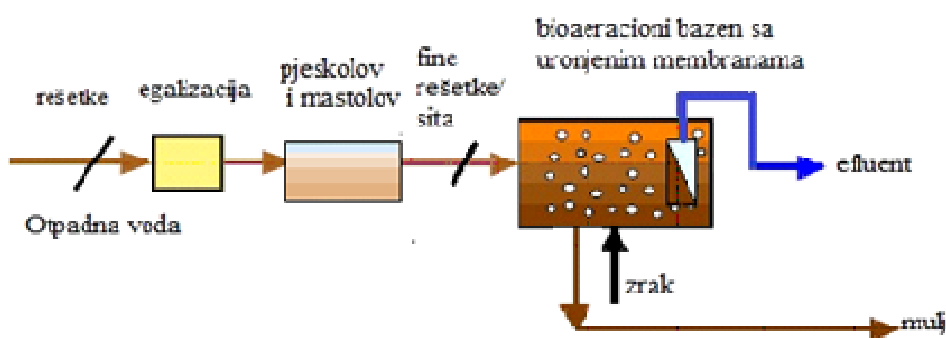
2. POREĐENJE KONVENCIONALNIH I MBR UREĐAJA

Konvencionalni tretman prečišćavanja otpadnih voda sa aktivnim muljem uglavnom obuhvata mehanički predtretman, taloženje krupnih, taloživih materija, izdvajanje ulja i masti, zatim, anaerobnu/aerobnu razgradnju organskih materija te nakon toga, odvajanje biomase od prečišćene vode u naknadnim taložnicama. Kod primjene MBR tehnologije, odvajanje biomase ili kako se još češće koristi naziv, aktivnog mulja (AM) od prečišćene vode odvija se pomoću membranske filtracije u zamjenu za gravitacione, naknadne taložnice u konvencionalnim uređajima za prečišćavanje sa aktivnim muljem (CAS) (slika 1a i 1b). S obzirom da naknadni taložnici čine oko 30% površine uređaja, primjenom MBR-a bitno se smanjuje površina uređaja, što je nekada presudno za izbor lokacije i položaja uređaja.

Neke od osnovnih razlika između CAS i MBR tehnologija za prečišćavanja ogledaju se u parametrima za projektovanje i pogon, kao npr. veće koncentracije



Slika 1a. Shema konvencionalnog uređaja sa aktivnim muljem (CAS)



Slika 1b. Shema MBR uređaja (MBR)

suhe mase mulja kod MBR uređaja (konvencionalni uređaji se projektiraju sa prosječnom koncentracijom suhe mase mulja od 3 -5 gSM/L, a MBR čak i do 40 gSM/L), duže vrijeme zadržavanja mulja u MBR sistemu (konvencionalni do 25 dana, a MBR 30 dana do više mjeseci), bolji kvalitet stabilizacije mulja i manje količine viška mulja kod MBR uređaja (kod MBR uređaja produkcija viška mulja je daleko manja, a kvalitet izdvojenog mulja je takav da ne zahtjeva dalju obradu), zatim značajna razlika u kvalitetu efluentu zbog procesa filtracije i dr. Kao i kod konvencionalnog uređaja za prečišćavanje sa aktivnim muljem, tako i kod MBR uređaja, uklanjanje nutrijenata zavisi od zahtjevanog stepena prečišćavanja, te MBR uređaj se kombinira sa anoksičnim i anaerobnim bazenima za uklanjanje azotnih spojeva. Membransko biološki reaktori razlikuju se i po konfiguraciji, u ovisnosti da li su membrane uronjene u reaktore ili su ugrađene izvan, u cijevne nosače (slika 4a i 4b). Također, membranski uređaji se razlikuju i po načinu proizvodnje i montaže tipova membrana, vrsti materijala i otvorima pora membrana kao i po radnim pritiscima, pa tako tipični, efektivni otvori pora za membrane korištene u procesu mikrofiltracije kreću se u opsegu od 0,1 – 0,4 mikrona, dok za membransku ultrafiltraciju ti otvori se kreću od

0,002 – 0,1 mikron. Osnovni parametri za projektovanje i ocjenu rada membrana su fluks (jedinичni proticaj kroz površinu membrane), permeabilnost membrana, stepen selektivnosti membrana, transmembranski pritisci, ciklusi operativnog pogona, očekivani vijek trajanja. Prema dosadašnjim iskustvima u pogonu MBR postrojenja, najosjetljivija tačka MBR uređaja je održavanje propusnosti membrana, odnosno sprječavanje zapunjenja membrana, te njihovo održavanje u pogonu.

3. KLASIFIKACIJE MEMBRANA

Membrane su glavni dio postrojenja za membransku separaciju tako da i učinak prečišćavanja tj. zadržavanja materija putem filtracije, u velikoj mjeri, zavisi od osobina i ponašanja membrana. Membrana predstavlja tanak, čvrst medij koji se ponaša kao selektivna barijera koja ima aktivnu, funkcionalnu ulogu u cijelom procesu. Stoga, vrste i osobine membrana veoma je bitno poznavati pri odabiru da bi se zadovoljili unaprijed definisani zahtjevi za njihovu upotrebu. Membrana se smatra kvalitetnom i dobrom za upotrebu ukoliko uz visok protok po jedinici površine (fluks) pokazuje i zadovoljavajuće rezultate zadržavanja, otpornost pri radu i vremenski očekivanu trajnost.

Membrane se mogu klasificirati prema:

- mehanizmu separacije,
- fizičkim osobinama membrana i konstrukciji,
- hemijskim karakteristikama.

Prema separacijskom mehanizmu, membrane su mikro (nanofiltracija (NF)), mezo (ultrafiltracija (UF)) i makroporozni (mikrofiltracija (MF)) pregradni slojevi čije je najznačajnije svojstvo polupropusnost.

Osnovna podjela mehanizma zadržavanja na membranama je :

1. Prvi mehanizam separacije koji se zasniva na razlici u veličini čestica i veličini pora membrane tzv. efekt prosijavanja (eng. sieve effect), a pokretački mehanizam je pritisak (Δp). Ovaj mehanizam se koristi za operacije mikro (MF) i ultrafiltracije (UF) primjenjene u tehnologiji MBR uređaja. U nastavku rada i istraživanja težište je stavljeno na primjenu ovog mehanizma filtracije kroz analizu pogona i primjene MBR uređaja.
2. Drugi, koji se temelji na razlici u topljivosti i difuzivnosti materijala membrane i otopine koja dolazi u kontakt s membranom (mehanizam otapanja/difuzije npr. reverzna osmoza (RO)). Kod ovog separacionog postupka koriste se guste membrane i visoki pritisci pri filtraciji.
3. Treći mehanizam je separacija koja se temelji na razlici u naboju čestica koje treba izdvojiti (elektrohemijski učinak). Membrane imaju fiksno pozitivan ili negativan električki naboj tzv. ionsko izmjenjivačke membrane, a koriste se za elektrodijalizu (ED), ali i za nanofiltraciju (NF).

Membranski separacijski postupci definiraju se kao postupci koji pomoću membrane dijele ulazni tok na permeat, koji sadrži materije koje prolaze kroz membranu i koncentrat (retentat), koji sadrži materije koje membrana zadržava. Membrane mogu biti definirane prema namjeni za određeni tip membranske filtracije gdje se definiraju u smislu učinkovitosti prema promjeru pora, obično izraženo u nm ili ($1\text{ nm} = 0,001\text{ }\mu\text{m}$) opsegom razdvajanja prema molekularnoj masi (eng. molecular weight cut off - MWCO). MWCO je karakteristična veličina za određenu membranu i definiše se kao molekulaska masa onih jedinjenja, koja se na datoj membrani zadržavaju u količini većoj od 90% (Cheryan, 1986) i izražava se u Daltonima (Da) 1 Da predstavlja masu jednog vodikovog atoma.

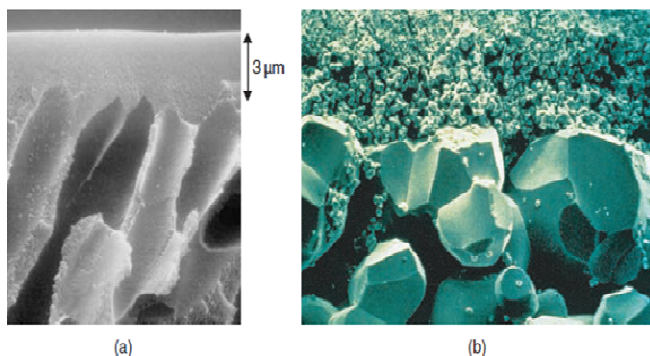
Veličine pora membrana za pojedine separacione procese su sljedeće: reverznom osmozom (RO) se zadržavaju molekule i ioni ($0,0001$ do $0,001\text{ }\mu\text{m}$), a nanofiltracijom (NF) se zadržavaju čestice $0,001$ do $0,01\text{ }\mu\text{m}$. Ultrafiltracijom (UF) se izdvajaju čestice od $0,005$ do $0,2\text{ }\mu\text{m}$ dok se mikrofiltracijom odvajaju čestice veličine od $0,05$ do $2\text{ }\mu\text{m}$.

Za navedene membranske separacijske postupke veličina pora pada od mikrofiltracije do reverzne osmoze, a time raste radni pritisak (TMP), budući da je hidrodinamički otpor sve veći, RO zahtjeva visoke pritiske u cilju savladavanja osmotskog pritiska. Za mikro i ultra filtraciju koriste se pritisci u opsegu od $0,1$ do 10 bara (Amr, 2007; Li et al, 2003). Normalno, veći pritisak, odnosno manji otvori rezultiraju boljim izdvajanjem materija sve manjih veličina, sve do veličine molekule vode. U tehnologiji membranske filtracije, koja se primjenjuje za MBR uređaje, koristi se mikro i ultra filtracija (MF i UF) s veličinom otvora pora od obično $0,01\text{ }\mu\text{m}$ do $10\text{ }\mu\text{m}$ (WEF, 2006).

Osim klasifikacije membranskih procesa prema mehanizmu zadržavanja (veličinama otvora pora i radnim pritiscima), podjela membranskih procesa se vrši i prema fizičkoj morfologiji i hemijskom sastavu membrana, konfiguraciji membranskih uređaja i uloge u konfiguraciji membransko bioloških reaktora.

Klasifikacija membrana prema morfologiji ovisi o vrsti materijala od kojih su membrane napravljene kao i od poroznosti membrana. Prema poroznosti membrana, ona može biti ista ili različita. Ukoliko je ista, radi se o izotropnim membranama, a ukoliko je različita govorimo o anizotropnim membranama. Anizotropne membrane mogu biti asimetrične (napravljene od istog materijala) i kompozitne (sastavljene od dva ili više različitih materijala) membrane. Anizotropne membrane se sastoje od tankog površinskog sloja koji obezbjeđuje zahtjevanu polupropusnost (permselektivnost) i od donjeg, debljeg sloja sastavljenog od jednog ili više materijala.

Prema vrsti materijala od kojih su napravljene (hemijskom sastavu), membrane se mogu podijeliti na organske i anorganske. Od raspoloživih materijala za membrane, za MBR uređaje najčešće se koriste polimerne i keramičke membrane. Brojni su različiti polimerni i keramički materijali od kojih se proizvode membrane, ali se može istaći da su uglavnom anizotropne, što znači, kako je već ranije rečeno, da je presjek membrana različite poroznosti (slika 2)



Slika 2. Uvećani presjek kroz membranu : anizotropne UF membrane (a) polimerne (sa naznačenom debljinom površinskog sloja) i (b) keramičke membrane (Judd, 2006)

Iako se u principu, bilo koji od polimera može koristiti za proizvodnju membrana, samo ograničen broj materijala je pogodan za separaciju u prečišćavanju otpadnih voda. Najviše zastupljeni su:

- aromatični poliamidi,
- poliakrilnitril (PAN),
- politetrafluoretilen (PTFE),
- poliviniliden fluorid (PVDF),
- polisulfon (PSf)
- polietersulfon (PES),
- polietilen (PE),
- polipropilen (PP).

Prednost primjene polimera je niska cijena ali, s obzirom da su hidrofobni materijali, osjetljivi su na začepljenje pora drugim hidrofobnim materijama iz biomase koja se filtrira kroz membrane. Keramičke membrane imaju odličan kvalitet i dugotrajnost ali su ekonomski nepovoljnije, osobito kod velikih postrojenja dok za mala, industrijska postrojenja odstupanja su manja od cijena polimernih membrana (Judd, 2006).

Danas, uglavnom, vodeći proizvođači membrana za MBR uređaje koriste polimerne membrane. U tabeli 1. prikazan je pregled nekih od materijalaza membrane i primjeri primjene u svijetu.

Ispitivanja membrana izrađenih od različitih vrsta materijala (Eurombra-D5, 2006) došlo se do rezultata da zaprljanje i obraštaj membrana je povezan sa interakcijom membranskog materijala i komponenti aktivnog mulja. Općenito se smatra da ekstracelularne polimerne materije (EPS) igraju glavnu ulogu u zaprljanju membrana. EPS su spojevi uglavnom proteina, polisaharida i huminskih materija koji se lijepe i zapunjavaju površine membrana. Jednako važna ispitivanja su vršena i u pogledu hidrofilno/hidrofobnih

svojstava membranskih materijala. Uporednim testiranjem izrazito hidrofilnih membrana (celulozni acetat CA), hidrofobnih membrana (polietersulfon PES) i srednje hidrofobnih membrana, sulfonirani polisulfon (SPES) (Eurombra-D5, 2006) došlo se do zaključka da su hidrofobne membrane mnogo osjetljivije na onečišćenja od hidrofilnih koje imaju manji stepen interakcije vezivanja sa komponentama iz aktivnog mulja.

Upoređujući dva hidrofobna polimerna membranska modula, napravljena od polietilena (PE) i poliviniliden fluorida (PVDF), u toku filtracije iste otpadne vode, (Yang et al, 2006), u istim uvjetima, pokazala su superiornost PVDF membrana u odnosu na PE u smislu prevencije i otpornosti na začepljavanje.

Također, potrebno je napomenuti da mikroorganizmi imaju sposobnost razgradnje celuloznog acetata (CA) te se CA membrane ne koriste u MBR uređajima (Eurombra - D5, 2006).

4. VRSTE MEMBRANSKIH MODULA

Konfiguracija membrana, odnosno njihove geometrijske karakteristike, te način na koji se montiraju i orijentiraju u odnosu na tok vode su od presudne važnosti u određivanju karakteristika cjelokupnog procesa. Ostala praktična ispitivanja i razmatranja odnose se na povezivanje membrana u module, odnosno njihovo «uvezivanje» u cjelinu.

Projektovanje membranskih modula, po definiciji (Judd, 2006) dozvoljava modularni pristup proizvodnji i primjeni membrana, a sve više se ispituje i moguća standardizacija, što predstavlja jednu od pozitivnih karakteristika pri izboru membranskih procesa.

Trenutno, postoji šest osnovnih konfiguracija koje se primjenjuju u membranskim procesima. Svi tipovi imaju različite praktične prednosti, ali i mane i ograničenja. Konfiguracije se uglavnom razlikuju geometrijski kao ravne ili cilindrične, a dijele se na :

- ploča i okvir / ravna platna (eng. flat sheet (FS))
- šuplja vlakna (eng. hollow fibre (HF))
- (multi)tubularne membrane (MT)
- kapilarne cijevi (CT)
- nabrani filter ulošci (eng. pleated filter cartridge (FC))
- spiralno namotane membrane (eng. spiral-wound (SW))

Od svih nabrojanih konfiguracija, samo prve tri su pogodne za primjenu kod MBR uređaja.



Slika 3. Tipovi membrana: spiralno namotane membrane, cjevne membrane od polimera, keramičke cjevne membrane i šuplja vlakna

(www.membranespecialists.com/choosing-the-right-membrane.php)

Od svih navednih tipova membrana, ravna platna (FS) i šuplja vlakna (HF) dominiraju MBR tržištem danas, od toga, najzastupljeniji proizvođači na svjetskom tržištu su Kubota (FS) i Zenon (HF).

Za vanjske, tubularne module postoji niz proizvođača kao što su npr. Norit, Wehrle i dr. Wehrle Environmental (Wehrle Werk AG) već dugi niz godina primjenjuje tubularne membranske module (TM) u membranskom biorektoru sa tokom sa strane (sMBR) Wehrle Environmental MBR uređaji su u nekoliko slučajeva bili izbor za tretman procjednih voda sanitarnih deponija (od 1990.) Osim navedenih proizvođača, u literaturi i na MBR tržištu se pojavljuju i mnogi drugi proizvođači sa različitim rješenjima, stepenom uspješnosti, zastupljenosti proizvoda te rezultata rada uređaja kao što su: Degremont, Siemens, Koch, Puron, Rodella i mnogi drugi.

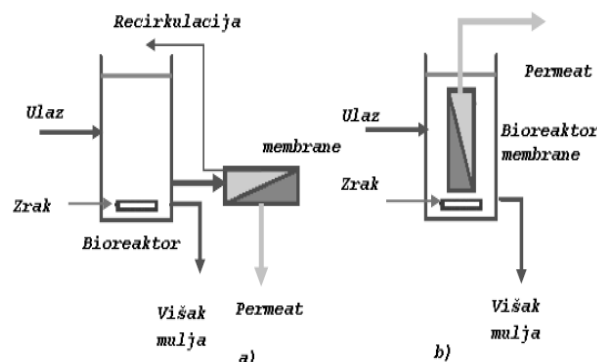
Iako se u tom domenu provode razna istraživanja u vezi testiranja raznih faktora i međusobnih interakcija influent – membrane (Eurombra-D5, 2006) rezultati i dalje smjernice u najvećoj mjeri ovise o vrsti membrana i njihovoj ulozi u tehnološkom procesu, vrsti otpadnih voda, režimu rada i održavanja membrana u pogonu i dr. Danas se u svijetu primjenjuju različiti tipovi, konfiguracije i materijali u sklopu MBR sistema. Razvoj primjene MBR uređaja u svijetu, od početka prvih, pionirskih koraka do sadašnjih izazova i primjene u tretmanu otpadnih voda je dat ukratko u nastavku rada u cilju sagledavanja primjene MBR uređaja, ali i sticanja veoma bitnih, iskustvenih podataka sa uređaja koji su u pogonu. Stoga su i dalje iskustveni pokazatelji, dalja znanstvena istraživanja od izuzetnog značaja za širu primjenu ovih postrojenja, a osobito kod kompleksnijih

zadataka kao što su prečišćavanja industrijskih otpadnih voda i procjednih voda sanitarnih deponija.

5. OSVRT NA RAZVOJ I PRIMJENU MBR-a

Prvi membransko biološki reaktor koji se pojavio na tržištu krajem 60-tih godina proizvela je kompanija Dorr –Oliver Inc. (USA) kao pilot uređaj za tretman komunalnih otpadnih voda. (Bemberis *et al.*, 1971). Uređaj se zasnivao na ultrafiltraciji (UF) kroz membranska platna sa visokim radnim pritiscima (3-5 bara) i za manje proticaje (fluks do $17 \text{ l/m}^2\text{h}$). Uređaj se sastojao od ulazne rešetke, biološkog reaktora i polimernih membranskih platana sa otvorima pora ($0,003$ do $0,010 \mu\text{m}$). Uređaj je bio dimenzioniran na $2,7 \text{ m}^3$ /dan i testiranja su trajala godinu dana, Rezultati su bili zadovoljavajući, ali evidentirani su problemi sa protokom kroz membranska platna (Stephenost *et al.*, 2000). Bez obzira na mane, prvi MBR uređaj je uspio promovirati novu tehnologiju prečišćavanja otpadnih voda kombinirajući tehnologiju prečišćavanja aktivnim muljem sa tehnologijom membranske filtracije. Licenca na uređaj i dalja istraživanja su data japanskoj firmi Sanki Engineering, Tokio i u periodu od 1974. do 1987. godine instalirano je prvih 20 MBR uređaja (Stephenson *et al.*, 2000) na japanskom tržištu.

Prvi MBR sistemi su razvijani isključivo kao uređaji kod kojih su membrane bile spojene u toku «sa strane» tzv. „side-stream“ konfiguracija (sMBR slika 4a), za razliku od današnjeg trenda češće primjene MBR uređaja kod kojih su membrane uronjene u bioreaktore (iMBR, slika 4b) (Judd, 2006).



Slika 4. MBR sa membranama izvan i uronjenim u bioreaktor (Serdarević, 2011)

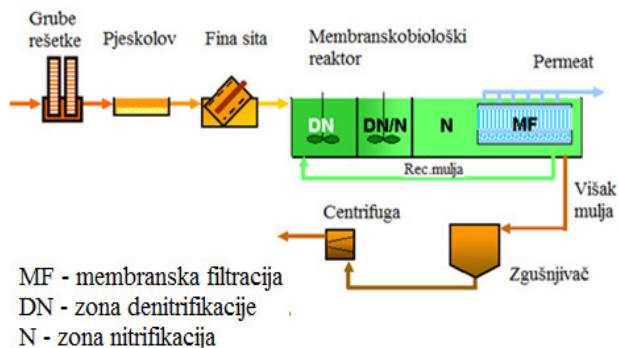
Krajem 80-tih godina, počinju sve veća istraživanja u primjeni membrana za prečišćavanje otpadnih voda, tj. u sklopu MBR uređaja. Tako se u Japanu izvode testiranja sa uronjenim membranskim modulima

(Yamamoto *et al*, 1989) instaliranim u MBR uređaj sa membranskim šupljim vlaknima koji su bili direktno uronjeni u bioaeracioni bazen. Također, na američkom tržištu, u istom periodu kompanija Thetford System razvija model MBR uređaja po nazivom Cycle-Let sa tokom sa strane (side – stream) u namjenu recikliranja otpadnih voda, dok kompanija Zenon Environmental (Kanada) testira svoje prve membranske uređaje sa šupljim vlaknima uronjenim u bazene („immersed” iMBR). Tako se na tržištu Sjeverne Amerike pojavljuje prvi iMBR uređaj sa uronjenim membranskim šupljim vlaknima pod nazivom ZenoGem (Judd, 2006).

Početkom 90-tih godina, u Japanu, dolazi do tehnološkog i industrijskog proboja MBR procesa, u smislu primjene potopljenih membranskih modula sa primjenom ravnih membranskih platana (Flat Sheets (FS)). Uređaji su dizajnirani na manje radne pritiske, smanjenom potrošnjom energije, sistemom filtracije izvana – unutra, rastresanjem i propuhivanjem membrana u cilju smanjenja začepljavanja. Modele je počela ispitivati japanska kompanija Kubota, i prvi pilot uređaj je instaliran i testiran 1990. u Hirošimi sa proticajem od 25 m³/dan (Judd, 2006). Prvo MBR Kubota pilot postrojenje, izvan Japana, instalirano je 1996. godine u Engleskoj, Kingston Seymour, sa ravnim membranskim platnima (FS), kapaciteta 130 m³/dan sa površinom membrana od 240 m² i sa fluksom od 22 L/m²·h. Uskoro su izgrađena i prva postrojenja u Njemačkoj (Büchel i Rödingen 1999., za 1000 i 3000 ES) i Perthes-en-Gâtinais MBR postrojenje u Francuskoj (1999. za 4500 ES). Samo nekoliko godina kasnije, u novembru 2002. pušteno je jedno od većih MBR postrojenja u Brescia, Italija, sa početnim proticajem od 38 000 m³/d, koji je poslije povećan na 42 000 m³/d. Razvoj i primjena MBR tehnologije su se kretali sve brže i 2004. godine, pušten je u pogon najveći MBR uređaj za tretman komunalnih otpadnih voda u Njemačkoj (Kaarst, Nordkanal) sa maksimalnim dnevnim proticajem 45 000 m³/dan, za 80 000 ES. (Lesjean *et al*. 2007).

Shema jednog od najvećih MBR uređaja data je na slici 5. Linija prerade vode (slika 5) počinje sa prolaskom otpadnih voda kroz grube rešetke otvora 5mm, zatim influent prolazi kroz aerirani pjeskolov iza čega su instalirane fina sita otvora 0,5 mm. Potom slijedi anoxicna zona (gdje se odvija denitrifikacija) a zatim slijede bioaeracioni bazeni u kojima su uronjeni membranski moduli (ultrafiltracija sa šupljim membranskim vlaknima (HF)). Objekti sekundarnog

tretmana zauzimaju samo ¼ prostora koji bi bio potreban za konvencionalni uređaj sa aktivnim muljem.



Slika 5. Shema MBR uređaja Nordkanal Kaarst

(www.erftverband.de/uploads/pics/verfahrensschema_01.jpg)

Otvori na vlaknima membrana su 0,04 μm i nakon membrana, efluent postrojenja se ispušta u Nordkanal bez ikakve dalje dezinfekcije. Prosječne vrijednosti efluenta postrojenja iznose BPK₅ manji od 3 mg/L, HPK manje od 20 mg/L, TSS i mutnoća manje od 0,1 NTU. Membrane se održavaju naizmjeničnim pranjem iznutra – vani i propuhivanjem zrakom. (Engelhardt, 2011)

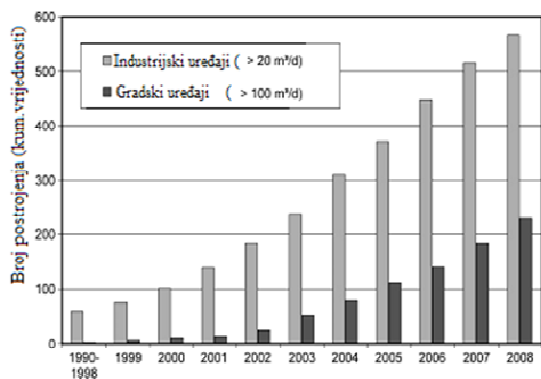
Osim prikazanog MBR postrojenja u Kaarst-u, razvoj i primjena MBR tehnologije, od «vrlo malih» postrojenja do «vrlo velikih» postrojenja, bilježi značajan zaokret u pristupu i izboru metode koji se desio u samo nekoliko godina (od 1998 do 2004), a neki od MBR instaliranih uređaja su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Primjeri primjene u tretmanu komunalnih otpadnih voda (Amr, 2007)

Tip membranske filtracije za MBR uređaj	Konfiguracija MBR uređaja	Veličina postrojenja	Efikasnost tretmana	Zemlja
UF - keramički moduli	Vanjska ugradnja	125 m ³ /d	Efluent HPK 5 mg/l	Japan
UF - Polimerni moduli	Vanjska ugradnja	Pilot post. 360 - 840 m ³ /d	Efluent TOC 12 mg/l	Holandija
UF - keramički moduli	Vanjska ugradnja	Labaratorijsko postrojenje 0,16 m ³ /d	Uklanjanje HPK 98%	SAD
UF - Polimerni moduli	Uronjeni moduli	Pilot postrojenje 6 - 9 m ³ /d	Uklanjanje HPK 95%	Njemačka
UF - Polimerni moduli	Uronjeni moduli	750 m ³ /d	Efluent BPK 1 mg/l	SAD
UF - Polimerni moduli	Uronjeni moduli	9000 m ³ /d	Uklanjanje HPK 95%	SAD

Značajan broj članaka i knjiga koje su objavljene o rezultataima rada MBR uređaja su se odnosile na pilot postrojenja ili laboratorijske testove na modelima MBR uređaja u pogonu. Jedno od takvih je još jedno veliko MBR postrojenje za tretman komunalnih otpadnih voda u Varsseveld-u, Holandija. kapaciteta 23150 ES, 755 m³/h, pušteno u pogon 2005 godine. Projekat je uključivao obimna istraživanja rada ovog uređaja kao pilot postrojenja u trajanju od pet godina sa više publikacija, rezultata i iskustvenih zaključaka. Predtretman na ovom postrojenju je projektovan sa grubim rešetkama na ulazu (6 mm), zatim aerirani pjeskolov sa mastolovom i mikrosita (0,8 mm) čime se uklanja oko 20-30% HPK; BPK i SS, a 5-10% N i P. (Van Bentem et al, 2007) Za membransku filtraciju je izabrana ultrafiltracija, sa uronjenim membranskim modulima od šupljih vlakana (Zenon). Površina ugrađenih membrana iznosi 20160 m², fluks kroz membrane pri kišnom dotoku iznosi 37,5 L/m²h, a koncentracija aktivnog mulja (MLSS) iznosi 10g SM/L. Membrane su raspoređene u četiri odvojena dijela tako da je moguće rad membrana podesiti prema dotoku. Postrojenje je u pogonu i bez problema se ostvaruju postavljani uvjeti za kvalitet effluenta za TN < 5mg/L i TP < 0,15mg/L.

U periodu od 2005 godine do 2009 godine, Evropska Unija je finansirala dva glavna istraživačka projekta koja su obuhvatila sve aspekte MBR tehnologije (AMADEUS I EUROMBRA) a rezultati i cjelokupni izvještaji se mogu naći na web stranici posvećenoj MBR tehnologiji www.mbr-network.eu (Kraume i Drews, 2010, Eurombra-D5, 2006; Eurombra-D16, 2006) Razvoj i uspješna komercijalizacija tehnologije, u posljednjih nekoliko godina, dovela je do značajnog smanjenja u investicionim i operativnim troškovima. Analiza trenda primjene MBR uređaja u Evropi, prikazana je na slici 6, gdje se može uočiti da oko 2/3 od instaliranih postrojenja su industrijska.

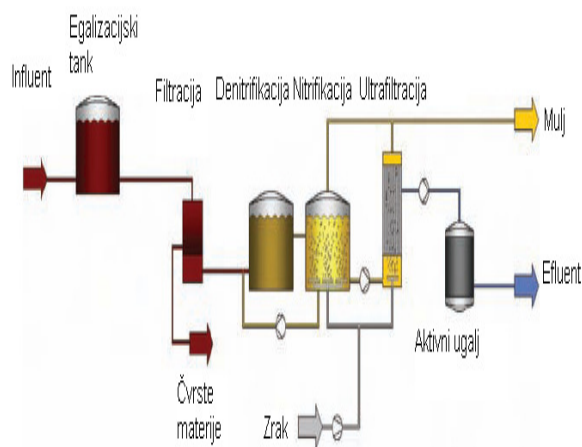


Slika 6. MBR uređaji u Evropi postrojenja

Ipak, ako se poredi instalirana površina membrana, uređaji za tretman komunalnih otpadnih voda pokrivaju 75% tržišta (Lesjean i Huisjes, 2008), sa 11 većih postrojenja (>5000 m³/d), što čine više od 50% instaliranih kapaciteta MBR uređaja. Analiza industrijskih i gradskih postrojenja pokazuje da MBR tehnologija se opravdano primjenjuje kao tehnologija izbora kod industrijskih postrojenja, dok kod postrojenja za tretman gradskih otpadnih voda još uvijek nije uporediva sa troškovima konvencionalnih tretmana. Utrošak energije i dalje je veći za 30 -50 %. (Lesjean i Huisjes, 2008) Ukoliko se ovo odstupanje u energetskim potrebama smanji, MBR tehnologija će postati sigurno i *state of the art* za tretman komunalnih otpadnih voda (Lesjean i Huisjes, 2008).

Pored primjene za tretman komunalnih otpadnih voda kao i industrijskih otpadnih voda, MBR uređaji su testirani i za preradu procjednih voda deponija. U klasičnom smislu, do sada primjenjeni MBR uređaji za tretman procjednih voda, obično se sastoje od fizičko-hemijskih postupaka, bioloških postupaka prečišćavanja i membranske filtracije na kraju, a osnovu za dimenzioniranje predstavlja organsko opterećenje i HRT. Primjenjeni MBR uređaji često imaju ulogu predtretmana za reverznu osmozu (RO).

Iako su primjenjeni vrlo rijetko, jedan od MBR uređaja za tretman procjednih deponijskih voda je postrojenje u Freiburg-u, Njemačka, kapaciteta 100 m³/d, predstavlja prve primjere konfiguracije MBR airlift-a za tretman procjednih voda. Postrojenje je u funkciji od 1999. i projektovano je za uklanjanje amonijaka i HPK. Brzina proticaja kroz postrojenje je 2 m/s, fluks se kreće u opsegu od 50 do 60 L/m²h, a potrebna energija za operativni pogon postrojenja iznosi 2-3 KW/m³.

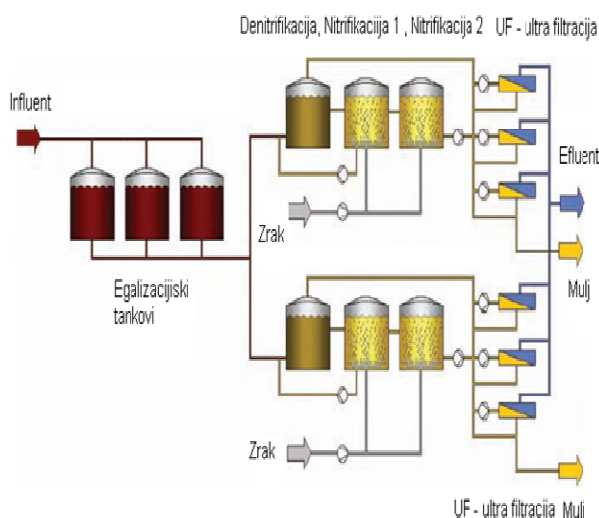


Slika 7. MBR postrojenje u Freiburg-u (Judd, 2006)

Usljed intenzivnih padavina, fluks se nekada povećava i do $90 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$, što povećava i potrošnju energije na $5\div 6 \text{ KW/m}^3$. U toku sušnih perioda, dio pogona se isključuje. Time se smanjuju i troškovi pogona. Koncentracija aktivnog mulja MLSS se generalno kreće između 12 i 15 gSM/L (slika 7).

Primjer MBR uređaja za procjedne vode velikog kapaciteta je uređaj instaliran u Bilbao (slika 8) koji je najveći uređaj na svijetu za ovu vrstu otpadnih voda i u funkciji je od 2004. Projektovani doticaj na postrojenje je $1800 \text{ m}^3/\text{d}$, a maksimalni doticaj registrovan je bio $2200 \text{ m}^3/\text{d}$.

Postrojenje je shematski prikazano na slici 8, a sastoji se od bioreaktora u nizu, sa hidrauličkim vremenom zadržavanja (HRT) od 15h , i starošću mulja (SRT) od 53 dana. Biološko prečišćavanje uključuje denitrifikaciju i nitrifikaciju, a unos kiseonika se iznosi $4000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Sav proces je odvojen u 2 paralelne linije. Aktivni mulj se iz obje linije pumpa u membranske jedinice koje su postavljene u dvije linije (ultrafiltracija). Membransko postrojenje radi sa srednjim TMP od 3 bara i fluksom od $120 \text{ L/m}^2/\text{h}$.



Slika 8. MBR postrojenje –Bilbao, Španija (Judd, 2006)

Poredeći ukupne operative troškove, airlift konfiguracija primjenjena na postrojenju u Freiburg-u, u odnosu na membranske module u toku sa strane, daje ukupno niže troškove pogona. U poređenju sa tretmanom industrijskih otpadnih voda, može se zaključiti da postrojenja za tretman procjednih voda rade sa većim troškovima, povezano uglavnom sa većom potrošnjom energije i kraćim životnim vijekom membrana, zbog slabije sposobnosti filtracije biomase

procjednih voda te češćim začepljavanjem membrana. Poređenje parametara rada na primjeru nekoliko MBR industrijskih uređaja prikazano je u tabeli 2.

Tabela 2. Podaci o radu nekih MBR uređaja za procjedne vode i industrijske otpadne vode (Robinson 2005, Judd 2006)

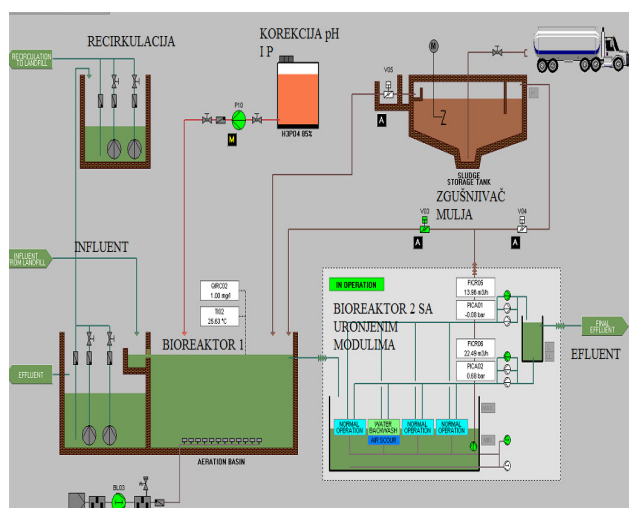
Postrojenja		Freiburg Procjedne vode	Bilbao Procj. vode	Kellogg Prehramb- ena ind.
Parametri	Jedinice			
Proticaj	m^3/d	120	1800	1800
Površina membrana	m^2	88	700	864
Fluks (sr.god.)	$\text{L/m}^2\cdot\text{h}$	54	102	71
Fluks (sr.dnevni)	$\text{L/m}^2\cdot\text{h}$	57	107	87
Ukupna cijena membrana	EUR	19 360	189 000	198 400
Vijek membrana	god	6	4	4,5
Zamjene membrana.	EUR/god	3227	47 250	44 089
Spec.potrebna energije	kWh/m^3	3	5	3,75
Spec.troškovi energije	EUR/kWh	0.06	0.06	0.06
Uk.energetski troškovi	EUR/god	7490	187 245	121 564
Uk. operativni troškovi	EUR/god	10716	234 495	165 653
Uk.specifični operativni troškovi	EUR/ m^3	0.26	0.38	0.31

MBR uređaji su instalirani i na nekoliko lokacija u BiH. Tako su prvi MBR uređaji instalirani za preradu industrijskih otpadnih voda, odnosno procjednih voda sanitarne deponije u Sarajevu. MBR uređaj za tretman otpadnih voda unutar pogona farmaceutske fabrike pušten je u pogon 2008. godine. Proticaj na koji je dimenzioniran uređaj je $Q_d = 30 \text{ m}^3/\text{d}$; $Q_{\text{maxh}} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$. Uređaj se sastoji od ulaznog okna sa rešetkom gdje je ujedno instaliran i mjerac protoka i pH vrijednosti, zatim egalizacionog bazena, zapremine 45 m^3 u kojem se vrši dnevno ujednačavanje dotoka. U svrhu mješanja i ujednačavanja kvaliteta tehnoloških otpadnih voda u egalizacionom bazenu instalirana je mješalica i sistem za aeraciju. Nakon egalizacionog bazena, slijedi bioaeracioni bazen zapremine cca, 50 m^3 , koncentracija suhe mase mulja iznosi 5 gSM/L , a u bioreaktor su uronjeni membranski moduli sa šupljim vlaknima (HF). Ukupna površina membrana iznosi 221 m^2 . Uređaj je u redovnom pogonu, a serija ispitivanja parametara

kvaliteta se prati u skladu sa zakonom propisanim. Drugi uređaj je testiran za preradu procjednih voda sa sanitarne deponije. MBR uređaj se sastoji od ulaznog šahta u kojem se mješaju različite vode koje se prikupljaju na deponiji, a u istom oknu se vrši i mjerenje dotoka na postrojenje. Postrojenje je projektirano na dnevni dotok od $450 \text{ m}^3/\text{d}$, međutim, u toku pogona, rad postojenja i membrana podešen je na realan dotok od cca. 3 L/s (fluks $7 \text{ L/m}^2/\text{h}$). Volumen bioreaktora iznosi $2 \times 500 \text{ m}^3$. U drugi bioreaktor uronjeno je 754 membranska uložka (2364 m^2), napravljenih od svežnjeva šupljih vlakana (HF). Održavanje je predviđeno ciklusima rasterećenja membrana propuhivanjem i povratnim pranjem, a minimum dva puta godišnje predviđeni su i generani remont i pranje modula izvan reaktora.



Slika 9. Spuštanje membrana u čistu vodu na MBR postrojenju deponije u Sarajevu (Serdarević, 2011)



Slika 10. Shema MBR uređaja na deponiji u Sarajevu

Postrojenje je testirano u roku probnog pogona od strane projekatana tehnologije. Period ispitivanja i praćenja uvjeta, kvaliteta, rezultata pogona, kao i troškova rada počeo je u julu 2008 godine i trajao do početka 2011 godine. Postrojenje je usljed mehaničkog kvara na sistemu cjevnih instalacija van funkcije, međutim iskustva u probnom pogonu su od velikog značaja za upoznavanje sa MBR tehnologijom, ali i sa prečišćavanjem vrlo zahtjevnog medija kao što su procjedne vode deponija. Za postrojenje je neophodno uraditi kompletan remont prije ponovnog puštanja u pogon. Još jedno MBR postrojenje u BiH je izabrano kao tehnologija za preradu komunalnih otpadnih voda, sa konačnom fazom za priključak 15000 ES, a u pripremi je izgradnja uređaja. Planirana je instalacija uronjenih membranskih modula (ravna platna (FS)), a dosadašnja iskustva u primjeni ove tehnologije u BiH će svakako biti od koristi i u probnom pogonu ovog postrojenja.

Primjena MBR tehnologije i poboljšanja u proizvodnji membranskih modula, sa kontinuiranim usavršavanjem ove tehnologije kako u svijetu tako i u regionu, sigurno će dovesti do novih iskustava i poboljšanja u radu postojećih i budućih MBR postrojenja.

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG RAZVOJA

Na osnovu svega iznesenog, činjenica je da MBR tehnologija dobiva na značaju i široj primjeni sve više. Brzi razvoj i usavršavanje MBR tehnologije prati razvoj industrije membranske opreme. Rezultati istraživanja i primjene pojedinih proizvoda kao i njihove performanse detaljno su opisane kroz različite istraživačke radove, a i dalje je evidentna stalna nadogradnja postojećih postrojenja u skladu sa razvojem MBR tehnologije. Uzevši u obzir gore navedene mane i prednosti za široku primjenu MBR tehnologije, trend primjene MBR tehnologije, u zadnje dvije dekade, je rastući na tržištu širom svijeta. Uprkos tome da su evidentirane poteškoće u radu MBR uređaja ili recimo da je složenost ove tehnologije zahtjevnija i u pogledu održavanja sistema, treba istaći prednosti MBR uređaja koje su presudne za izbor ove tehnologije, kao što su (Serdarevic, 2011):

- značajno manji prostor potreban za uređaj,
- bitno lakša kontrola mirisa jer se postrojenje može zatvoriti, a usljed dugog vremena zadržavanja mulja u sistemu, rad sa daleko većim koncentracijama aktivnog mulja (tipično od $8\text{--}12 \text{ g/L}$, a ide i preko 30 g/L) bez limitirajućih granica koncentracije suhe

mase mulja procesom taloženja u naknadnim taložnicama,

- visoka koncentracija suhe mase mulja omogućava rad MBR uređaja za potrebe jako opterećenih industrijskih influenata, osobito kad se radi o industrijama koje tako prečišćen efluent koriste ponovo kao tehnološku vodu,
- visoka koncentracija mulja, uz zadržavanje mulja preko 25 dana, karakteristike su prečišćavanja aktivnim muljem uz simultanu stabilizaciju mulja. Ovakav mulj nije podložan daljem truljenju i zahtjeva manje troškove za cca.40% od ukupne cijene uređaja za dalji proces odvajanja vode i sušenja tj. konačnog zbrinjavanja,
- moguće je postizanje zahtjevanje kvaliteta efluenta, međutim bitno je naglasiti da rad MBR uređaja uveliko ovisi o kvalitetu otpadne vode, odnosno o predtretmanu te pogonu uređaja, odnosno održavanju uređaja u kontinuiranom pogonu,
- primjenom membrana omogućeno je i uklanjanje bakterija, protozoa i većine virusa cca 99%,
- duže vrijeme zadržavanja mulja omogućava razgradnju molekula koje se teže biološki razgrađuju,
- potpuno je moguće daljinsko upravljanje cijelim sistemom putem automatizacije monitoringa i kontrole rada uređaja u cjelosti.

Iako je primjena membranske tehnologije za tretman otpadnih voda u svijetu u porastu sa nizom svojih prednosti, mora se uzeti u obzir osjetljivost MBR uređaja u prvom redu u pogledu održavanja membrana, a zatim i pogonskim troškovima koji nisu zanemarivi.

Stoga, dalja usavršavanja MBR tehnologije koja su u toku bi trebala poboljšati pouzdanost i sigurnost u radu MBR uređaja, osobito u pogledu otpornosti membrana na zapunjavanje. Takva poboljšanja direktno se odražavaju na postupke čišćenja, učestalost čišćenja, membrane duže traju, a samim time su operativni troškovi znatno niži. Novi tipovi membrana i MBR uređaja poboljšavaju već i dosadašnji visok stepen prečišćavanja. Također, prema literaturi, usavršavanja su evidentna i dalje se razvijaju i u domenu rada uređaja za medije visoke gustoće i viskoznosti, pH vrijednosti od 1 do 14 i dr. Još jedan segment vrlo je važan u pravcima daljeg istraživanja, a to je jednostavna i brza zamjena membranskih uložaka, kompaktnost i mala površina kao i mogućnost mobilnosti uređaja. Veći broj instalacija, kao i poboljšanja u radu MBR uređaja će se odraziti i na pad cijena membranskih modula, što je često faktor ograničenja u primjeni ove tehnologije na procese prečišćavanja otpadnih voda.

LITERATURA

- [1] Amr M. Abdel_Kader (2007) A Review of membrane bioreactors (MBR) technology and their applications in the wastewater treatment systems, Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11 2007 Sharm El-Sheikh, Egypt, pp 269-279
- [2] Bemberis, I., Hubbard, P.J. i Leonard, F.B. (1971) Ciek, N. A review of membrane bioreactor and their potential application in the treatment of agricultural wastewater, Canadian Biosystems Engineering, 45(6): pp. 37-47, 2003.
- [3] Cheryan, M. (1998), *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, Technomic Publishing Company, Inc.
- [4] Engelhardt, N., (2011), Membrane bioreactors restore health of German waterways Water-Wastewater-International, Volume 19/7
- [5] EUROMBRA D5 (2006) - Literature Review on Aeration and main Operating Conditions in Membrane Bioreactors, str 1-50
- [6] Huisjes, E, Colombel, K., Lesjean, B. (2009) Book of Proc.Final MBR-Network Workshop (Eds: B. Lesjean, T. Leiknes), Druckmuck, Berlin, pp. 81.www.mbr-network.eu
- [7] Judd, S., (2006), The MBR book of Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment, First edition, Elsevier, Oxford, 2006., ISBN-13: 978-1-85-617481-7
- [8] Kraume M., Drews A., (2010), Membrane Bioreactors in Waste Water Treatment – Status and Trends, Chem. Eng. Technol. 2010, 33, No. 8, 1251–1259, WILEY-VCH Verlag
- [9] Lesjan B. (edt.), Membrane Technologies for Wastewater Treatment and Reuse, Proceedings of 2nd IWA National Young Watre Professionals Conference, 4-6 June 2007, Berlin, Germany
- [10] Lesjean B., Huisjes E.H., (2008), Survey of the European MBR market: trends and perspectives, Desalination 231 (2008) 71–81, Elsevier B.V.
- [11] Robinson A.H., (2005), Landfill leachate treatment, Membrane Technology June 2005, 6-12, Cranfield University, UK
- [12] Serdarevic A., (2011), Membransko biološki reaktori u procesu prečišćavanja otpadnih voda, doktorska disertacija, Građevinski fakultet u

- Sarajevu, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo 2007. pp 187.
- [13] SFC Umwelttechnik GmbH, (2004) Environmental Engineering, „Kleinpilotanlage C-MEM“, Micro- and Ultra Filtration for Water and Wastewater Treatment, October 2004.
- [14] Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., and Brindle, K., (2000) *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. IWA Publishing: ISBN: 1-90-022207-8.
- [15] Water Environment Federation (WEF), (2006), *Membrane Systems for Wastewater Treatment*, WEFPress for the Water Quality Professional, ISBN 0-07-146419-0 (261 str)
- [16] Yamamoto, K., Hiasa, H., Talat, M. and Matsuo, T. (1989). Direct Solid Liquid Separation using Hollow, Fiber Membranes in an Activated Sludge aeration Tank, *Wat. Sci. & Tech.*, 21, 43-54
- [17] Yang, W., Cicek, N. and Ilg, J. (2006) State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Sciences*, 270, 201-211.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MBR TECHNOLOGY IN THE PROCESS OF WASTEWATER TREATMENT

by

Amra SERDAREVIĆ

Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevu
Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, BiH, e-mail: amra.serdarevic@gf.unsa.ba

Summary

The more stringent criteria with regard to the treatment of waste water leads to rapid development and application of technological innovation in the field of technology for wastewater treatment. The barriers in the application are often the perception of new technologies in an environment where they are implemented, with all challenges and modern equipment, but also the costs that accompany the introduction of new technologies. The membrane processes in wastewater treatment belong to the modern technology that gets a significant role during the last decade, especially due to the growing problem of a lack of drinking water and more stringent requirements in terms of effluent quality, and the need to reduce the size of the devices that are increasingly located near the source / village or in the village. The membrane processes, which usage dates

back from 1960. from the beginning were accompanied by extremely high capital costs due to the high cost of membranes and accessories. That's mostly been the main cause of the slower acceptance of this technology by end users. Enhanced development of membrane research and experience with the device in operation have enabled the application of new and better membranes with their longer life while dramatically reducing the price of the total costs. This paper presents the development and application of MBR technology with emphasis on the research results and the current status and trends in the application of MBR technology in the world.

Keywords: Membrane, MBR systems, fouling membrane, flux, permeate, transmembrane pressures

Redigovano 20.11.2014.