

1. UVOD

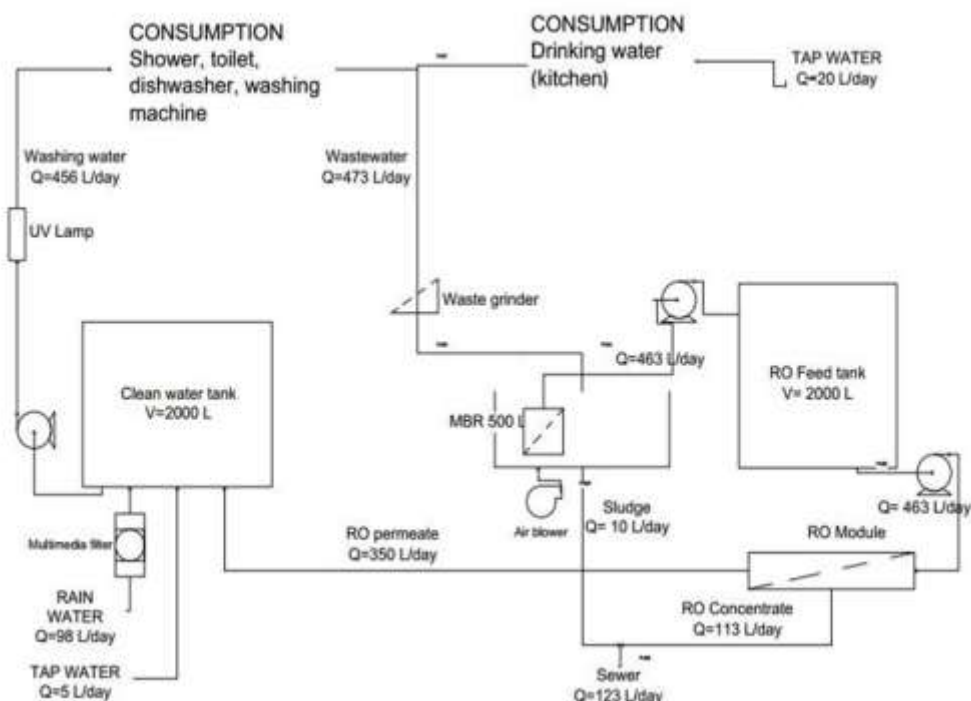
Voda je kemijski spoj dva atoma vodika i jednog atoma kisika i jedan od osnovnih uvjeta života. Najrasprostranjenija je kapljevina na Zemlji i najvažnije otapalo koje otapa kapljevine, plinove i mnogobrojne krutine. Voda je tekućina bez boje, mirisa i okusa te je bitan sastojak živih organizama i nužna je za život svih živih bića. Znanstvenici tvrde da se živa bića najvećim dijelom sastoje od vode i da ona čini tri četvrtine ukupne površine Zemlje, oko 70%. Ujedinjeni narodi su početkom trećeg tisućljeća, razdoblje od 2005. do 2015. godine proglasili Internacionalnim desetljećem vode te u sklopu projekta „Vodeni život“ domaći i strani znanstvenici su se složili da hrvatski vodeni resurs ima ekonomsku vrijednost koja premašuje lokalni i regionalni značaj. Naime, prema izvješću o opskrbi vodom, koji je napravljen od strane UNESCO-a kojim je obuhvaćeno 188 zemalja, Hrvatska se nalazi na visokom trećem mjestu Europe, a ispred nje su samo Norveška i Island. Hrvatska, prema izvješću, ima 32.818 kubičnih metara obnovljive pitke vode godišnje po stanovniku, a time spada među 30 najbogatijih zemalja u svijetu što se piće vodoopskrbe. Osim toga, Hrvatska je jedna od rijetkih zemalja čiji javni vodovod osigurava pitku vodu za svoje građane. Danas je voda iz javnih spremišta za vodu u Hrvatskoj opskrbljuje oko 80 % stanovništva. Planirano je da se Projekt širenja nacionalne vodoopskrbe završi do 2015. te da se njime postigne cilj da 94% stanovništva Hrvatske ima pristup javnoj vodoopskrbi. Kao što je spomenuto u tekstu gore, Hrvatska nema problema s količinom vode za piće, ali postoji značajan problem s održavanjem sustava i prvenstveno vodoopskrbe na nepristupačnim i zaštićenim područjima. Ranije je spomenuto da javna vodoopskrba u Hrvatskoj opskrbljuje oko 80 % stanovništva, što znači da oko jedna petina ljudi u Hrvatskoj još uvijek nema pristupa javnoj mreži. Pod nepristupačnim područjima prvenstveno se misli na otoke i zaštićena područja koja uključuju nacionalne parkove, parkove prirode i stroge rezervate. Očuvanje pitke vode ne podrazumijeva samo ograničenu upotrebu vode, nego i pametno raspolaganje vodoopskrbim resursima, upotrebu tehnologije kojom se osigurava recikliranje i štednja vode te brojne druge štedne mjere. Tim studenata Sveučilišta u Zagrebu (čija sam osobno članica), u sklopu projekta „Membrain“ odlučili su u sklopu svoje samoodržive, montažne, ekološki prihvatljive kuće instalirati i sustav za obradu otpadne vode. Tijekom projektiranja pažnju smo usmjerili na održivost i jednostavnost sustava. Sustav za obradu otpadne vode je kombinacija membranskog bioreaktora i modula za reverznu osmozu. Kombinacija ova dva navedena uređaja osigurava zatvoreni ciklus kruženja vode u kući te recikliranje 78 % vode.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. SUSTAV ZA OBRADU OTPADNE VODE

2.1.1. Opis sustava

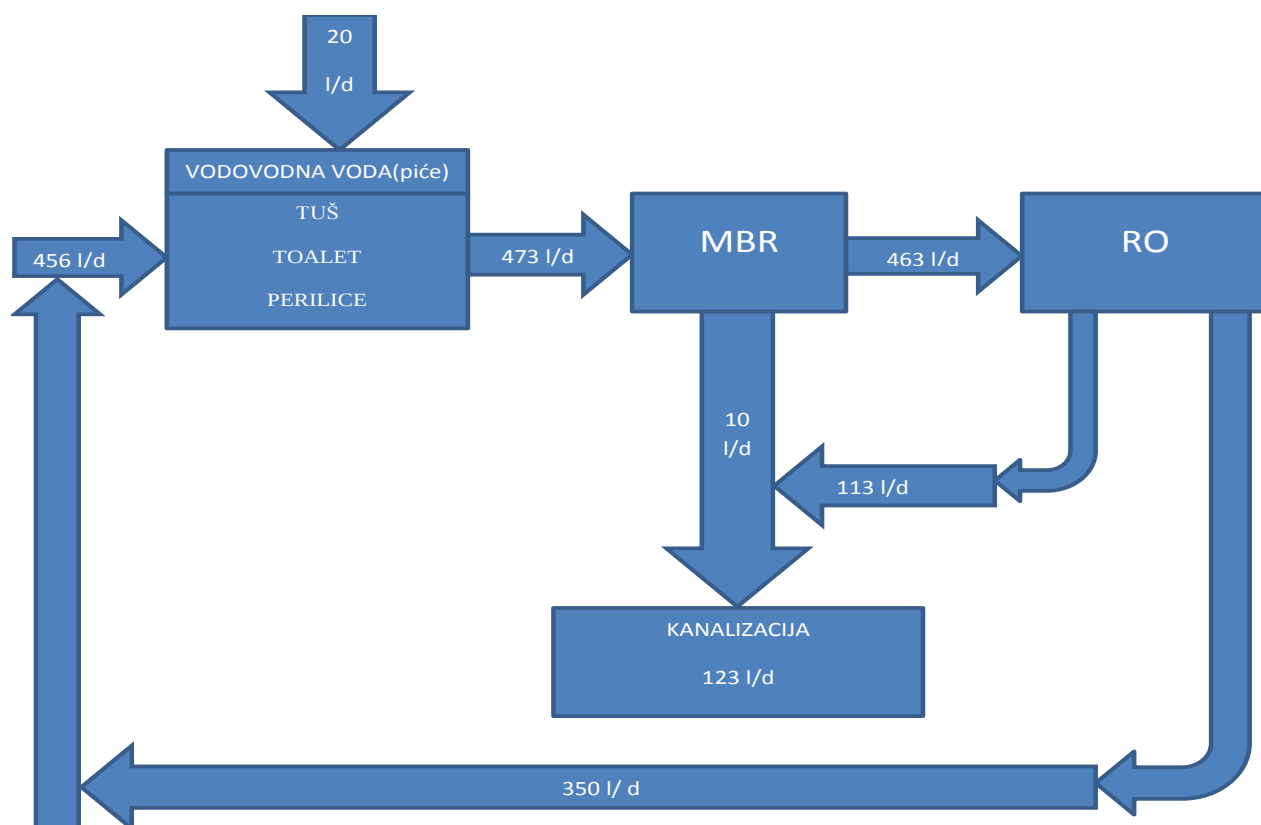
Sustav za obradu otpadne vode Membrain kuće osmišljen je za kućanstvo koje se sastoji od tri člana. Prosječna dnevna potrošnja vode u Zagrebu je 150 l/dan po stanovniku, dakle 450 l/dan za cijelo kućanstvo. Sustav za obradu otpadne vode (Slika 1) sastoji se od dva spremnika – spremnik čiste vode (clean water tank) s nivo sondom (2m^3) i spremnik reverzne osmoze (2m^3) (RO Feed tank). Jedinice sustava su UV lamp (UV lamp), membranski bioreaktor (600 litara) s membranom površine 3m^2 (dalje u tekstu MBR, na slici MBR) koji također ima nivo sondu, modul reverzne osmoze (dalje u tekstu RO, na slici RO module), usitnjivač otpada (waste grinder) i multimedijalni filter (multimedia filter) za kišnicu. Kruženje vode kroz kuću omogućavaju crpke. Crpka čiste vode stvara pritisak kojim omogućava opskrbu kućanstva vodom iz spremnika čiste vode, crpka permeata omogućuje transport permeata iz MBR-a u spremnik reverzne osmoze dok crpka reverzne osmoze stvara stvara potreban pritisak i tlači vodu iz spremnika reverzne osmoze na modul reverzne osmoze.



Slika 1. Shema sustava za obradu otpadne vode

Voda za potrebe kućanstva dobiva se iz spremnika čiste vode koji se puni na tri načina; puni se s prosječno 98 l/dan kišnice (izračunato prema prosječnoj vrijednosti padalina u Zagrebu), 350 l/dan pročišćene otpadne vode s reverzne osmoze koja je zadnja linija obrade te po potrebi sa 5 l/dan vodovodne vode u slučaju manjka kišnice. S obzirom da voda koja je prošla kroz sustav reverzne osmoze ne sadrži bakterije i soli, a kiša pri ulazu u spremnik prolazi kroz multimedijalni filter na kojem zaostaju bakterije i nečistoće, voda u spremniku čiste vode nije podložna kvarenju. Voda iz spremnika čiste vode (456 l/dan) pomoću pumpe prolazi kroz UV lampu pri čemu se uklanjaju eventualno prisutni mikroorganizmi (patogeni poput *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Enterococcus*, itd.) te se ta voda koristi za pranje, tuširanje, ispiranje toaleta, perilicu posuđa, perilicu rublja i sve ostale potrebe u kućanstvu. Otpadna voda (473 l/dan) koju čine siva voda (otpadna voda nakon pranja, tuširanja i perilica) i crna voda (otpadna voda toaleta) prolazi kroz usitnjivač otpada koji usitnjava krupni otpad te se sakuplja u MBR-u koji neprekidno radi i prosječno obradi 463 litara otpadne vode dnevno. U MBR-u se provodi aerobna razgradnja organskih sastojaka aktivnim muljem, a potreban zrak za aerobne uvijete osigurava MBR puhalo. Aerobnom obradom otpadne vode organski sastojci se prevode u biomasu aktivnog mulja i ugljični dioksid (CO₂). Iskustveno je poznato da je za 1kg biomase aktivnog mulja potrebno 2,5-3 kg KPK-vrijednosti. Višak biomase aktivnog mulja (10 l/dan) ispušta se pomoću automatski reguliranog ventila u kanalizaciju. Pročišćena voda prolazi kroz ultrafiltracijsku membranu na kojoj se zadržavaju sve bakterije i pomoću MBR pumpe odlazi u spremnik reverzne osmoze. Voda iz spremnika reverzne osmoze pomoću RO pumpe odlazi na sustav reverzne osmoze. Reverznom osmozom se voda filtrira pri čemu se iz nje uklanjaju soli i zaostali organski sastojci koji nisu biološki razgradljivi. Pročišćena voda (350 l/dan), koja je kvalitetom blizu kvaliteti demineralizirane vode, vraća se u spremnik čiste vode, a koncentrat reverzne osmoze (113 l/dan) kojeg čine soli i organski sastojci ispušta se u kanalizaciju. Iskorištenje reverzne osmoze je 75 % što je optimalno da reverzna osmoza može stabilno raditi, da ne dolazi do začepljenja membrane, a istovremeno se i obrađuje dovoljno vode. Modul reverzne osmoze isključuje se kada je jedna četvrtina spremnika čiste vode puna, što se detektira nivo sandom. Na taj način je osigurana dnevna potreba kućanstva za vodom, a omogućava se prikupljanje što veće količine kišnice jer je većina tanka čiste vode prazna i može primiti priljev od kiše. U kućanstvu se vodovodna voda koristi samo za piće, jer je pročišćena voda destilirana te stoga ne sadrži zakonom propisanu količinu minerala. Jedini priključak na javni vodovod nalazi se u kuhinji. Sudoper je priključen na javni vodovod, ali i na sustav obrade otpadne vode te ukoliko se slavina okrene potpuno desno teče hladna vodovodna voda, a kada se okrene potpuno lijevo teče topla

pročišćena voda. Postavljanjem slavine na sredinu dolazi do miješanja vodovodne vode s pročišćenom te je voda sobne temperature. Dnevna potrošnja vodovodne vode iznosi prosječno 20 litara. Povratkom pročišćene vode u spremnik čiste vode zatvorili smo krug vode u kući uz 78 %-tnu reciklaciju dnevno upotrijebljene vode. Slika 2 prikazuje bilancu vode u kućanstvu.



Slika 2. Shema bilance vode

2.1.2. Popis opreme

- Multimedijalni filter za kišnicu
- Automatski ventil za punjenje spremnika čiste vode vodovodnom vodom
- Spremnik čiste vode od 2 m³ s nivo sondom i preljevom u tlo
- Crpka čiste vode
- UV lampa
- Usitnjavač otpada (waste grinder)
- Membranski bioreaktor
 - o Radni volumen 400-500 L, ukupni volumen 600 L

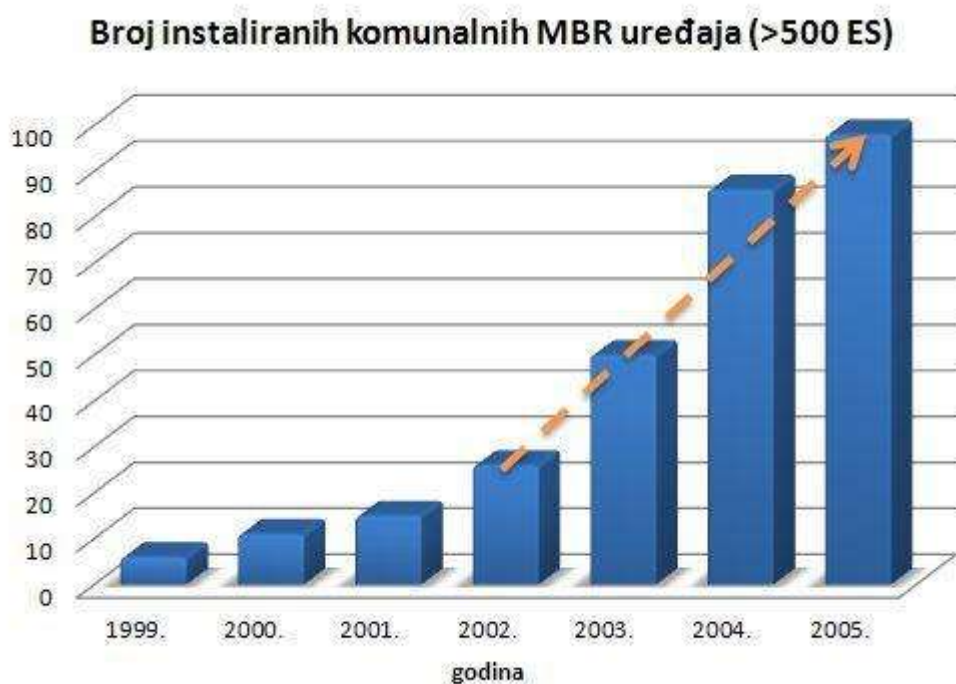
- o dubina 3 m
- o Membrana 3 m²
- o automatski ventil za ispuštanje mulja
- o puhalo 3 m³/h , 0,3 bara
- o crpka permeata 20L/h; 1 bar
- o nivo sonda minimum/maksimum
- o preljev u kanalizaciju
- Spremnik (RO feed tank) od 2 m³ s nivo sondom i preljevom u tlo
- Reverzna osmoza
 - o Crpka 15 bara, 40 L/h
 - o Tap Water membrana
 - o Iskorištenje 75% (10 L/h koncentrat, 30 L/h permeat)
- Cjevovodi, ventili i priključci

2.1.3.Opis automatike

- Crpka čiste vode – uključuje se po potrebi kada tlak u kućanstvu padne ispod zadane vrijednosti
- UV lampa - uključena samo kad je uključena crpka čiste vode
- Usitnjavač otpada – uključuje se diskontinuirano kad je pun
- Puhalo MBR-a - radi stalno
- Automatski ventil za ispuštanje mulja - diskontinuirano 10 L/dan vremenski
- Crpka permeata - uključuje se na maksimum nivo sonde MBR-a, isključuje na minimum
- Crpka reverzne osmoze
 - o uključuje se na minimum nivo sonde spremnika čiste vode
 - o isključuje se na maksimum spremnika čiste vode
 - o isključuje se na minimum sonde RO feed tanka
 - o uključuje se samo po danu
- Automatski ventil za punjenje spremnika čiste vode vodovodnom vodom
 - o Uključuje se kada je
 - Spremnik čiste vode na minimumu
 - RO feed tank na minimumu

2.2. MEMBRANSKI BIOREAKTOR

Tehnološka primjena membranskih (separacijskih) procesa i MBR tehnologije datira od kraja 60-tih godina. Američko i japansko tržište prvi su prihvatili novi vid obrade pomoću membrana. U međuvremenu tehnologija proizvodnje membrana toliko je napredovala da je njihova primjena moguća i ekonomski opravdana na svim poljima obrade i ponovne uporabe voda, tj. uklonjena je najveća dotadašnja zamjerka ovim sustavima - visoka cijena MBR sustava. Trenutni rast tržišta MBR tehnologije u svijetu je oko 11 % godišnje a povećanje kapaciteta obrade voda MBR uređajima rast 20% godišnje (Slika 3). Trenutno u svijetu postoji oko 3000 većih MBR pogona (većih od 5000 ES).

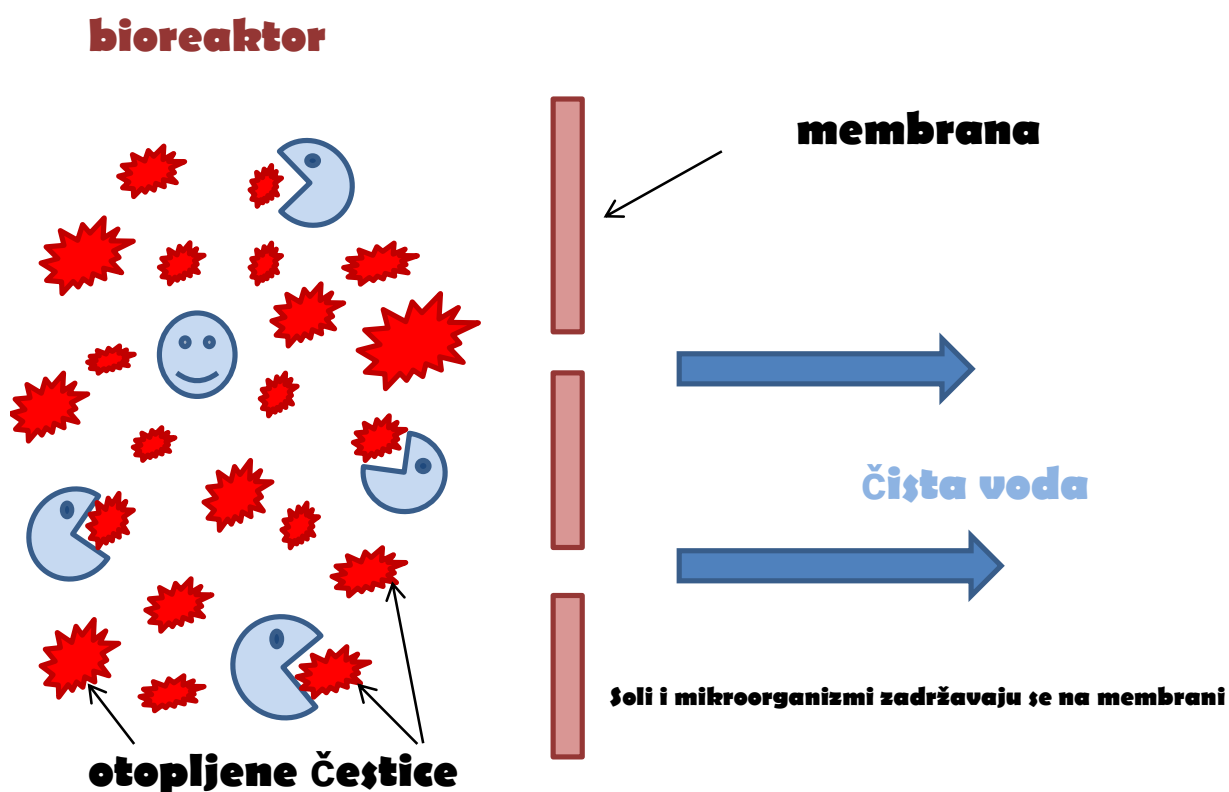


Slika 3. Porast broja instaliranih komunalnih MBR uređaja tijekom godina (Almes, 2014)

MBR (Membranski Bio Reaktor) je tehnologija koja odgovara i pripada grupi periodičke nestacionarne bioobrade. Primjena MBR procesa kod obrade komunalnih otpadnih voda je vrlo jednostavna gledano s mehaničkog aspekta i aspekta pogonskih uvjeta te s visokim stupnjem efikasnosti. Sustav predstavlja kombinaciju biološke obrade s aktivnim muljem i membranske filtracije u jednom procesu (Slika 4). Nakon biološke obrade voda se propušta kroz u našem slučaju ultrafiltracijske membrane, koje zadržavaju mikrororganizme i sve zaostale organske i anorganske tvari, a propuštaju vodu čija je kakvoća bolja od zakonski zahtijevane.

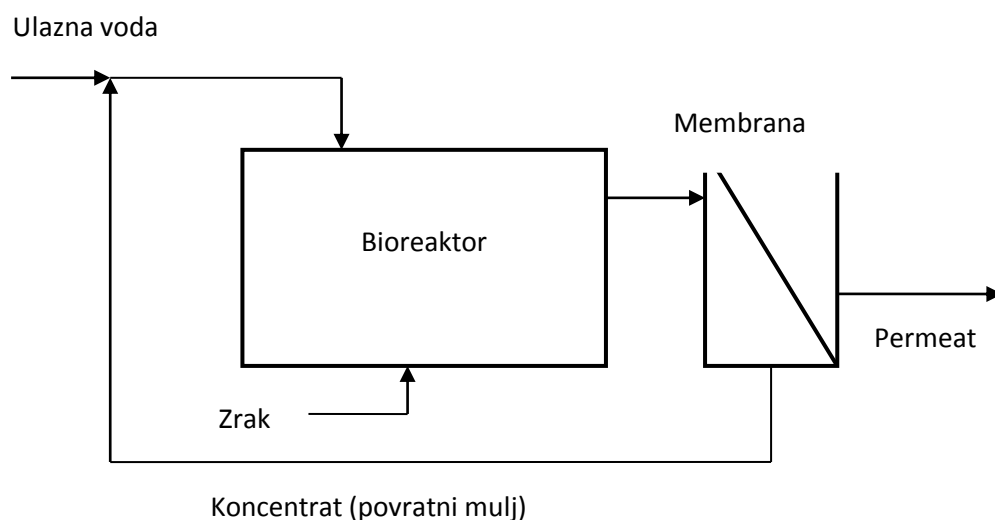
Tablica 1. Zakonski zahtijevana kvaliteta pročišćene vode za ispušt u recipijent II kategorije i izlazna kvaliteta pročišćene vode iz MBR uređaja(*Ovi podaci su samo informativnog karaktera i imaju namjeru prikazati opće sposobnosti membranske tehnologije za obradu voda)
(Almes, 2014)

Parametar	Dozvoljena koncentracija za ispuštanje u površinske vode (Pravilnik, 2013)	Vrijednosti MBR uređaja* (Almes, 2014)	Efikasnost MBR uređaja* (Almes, 2014)
BPK ₅ ,(mg O ₂ /l)	< 25	< 2	95-99%
KPKCr,(mg O ₂ /l)	< 125	< 20	90-96%
Suspendirana tvar(mg/l)	< 35	< 2	97-99%
Ukupni P(mg/l)	< 1	< 0,5	87-95%
Ukupni N(mg/l)	< 21	< 15	85-96%
Mutnoća (NTU)	< 1	< 1	99,9%
Uklanjanje bakterija (%)			>99,99%

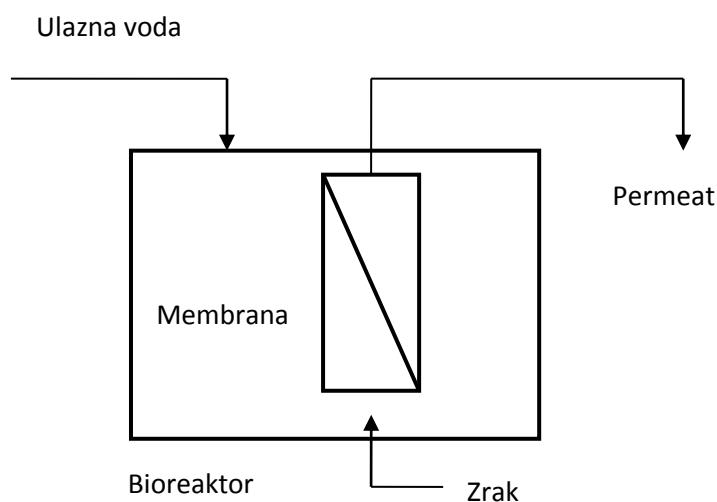


Slika 4. Shematski opis principa rada MBR-a

MBR jedinica, može biti izvedena modularno-montažno radi jednostavnosti izgradnje, iako se i varijanta građevine (MBR kao građevina) za iste karakteristike efluenta može izgraditi podzemno ili nadzemno, što ovisi o željama investitora i lokaciji samog uređaja. Membranski bioreaktor ima dvije konfiguracije; MBR s tangencijalnim filtracijskim modulom izvan bioreaktora i povratom koncentrata u bioreaktor (Slika 5) i MBR s membranom uronjenom u bioreaktor (Slika 6).



Slika 5. MBR s tangencijalnim filtracijskim modulom izvan bioreaktora i povratom koncentrata u bioreaktor(Matošić, 2014)



Slika 6. MBR s membranom uronjenom u bioreaktor(Matošić, 2014)

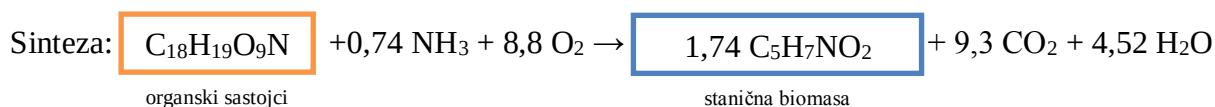
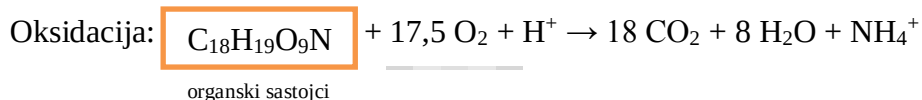
2.2.1. Aerobna obrada otpadne vode aktivnim muljem

Pokazatelji ukupnog onečišćenja otpadne vode su biokemijska potrošnja kisika (BPK) i kemijska potrošnja kisika (KPK). BPK₅ vrijednost određuje se BPK₅ testom koji se temelji na određivanju koncentracije otopljenog kisika u ispitivanom uzorku vode ili otpadne vode prije i nakon 5 dana na 20 °C u tami. Razlika između dviju vrijednosti koncentracija otopljenog kisika daje BPK₅-vrijednost koja se izražava u mg O₂/l. Kemijska potrošnja kisika je metoda kojom se određuje ukupna koncentracija oksidabilnih sastojaka u otpadnoj vodi. U većini otpadnih voda sastojci koji se oksidiraju su organskog podrijetla pa KPK vrijednost možemo smatrati pokazateljem onečišćenja vode organskim sastojcima te je ona uvijek veća od BPK₅ vrijednosti. Omjer BPK₅ i KPK vrijednosti je pokazatelj biološke razgradivosti sastojaka u otpadnoj vodi., a za otpadne vode kućanstva iznosi 0,4-0,8 što ukazuje na visoki stupnja biološke razgradivosti. Aerobna obrada otpadne vode aktivnim muljem je biološki postupak u kojem aerobni organizmi združenu u mješovitu mikrobnu zajednicu nazvanu aktivni mulj razgrađuju otopljene organske sastojke iz otpadne vode uz kisik unesen prozračivanjem s atmosferskim zrakom. Mikroorganizmi spojeve s ugljikom upotrebljavaju kao izvor ugljika i energije, a sastojke s dušikom i fosforom kao hranjive tvari. Aktivni mulj predstavlja prirodnu mješovitu mikrobnu zajednicu koja na zakonitostima simbiotskog djelovanja može istovremeno razgrađivati sastojke prisutne u otpadnoj vodi, a sastoji se od jednostaničnih organizama; kvasca, algi, protozoe, metazoe, pri čemu su najzastupljenije bakterije.

Iskorišćenje organskih sastojaka u prirast biomase mulja je iskustveno poznato i iznosi (2-1)

$$Y = \frac{0,45 \text{ kg biomase aktivnog mulja}}{1 \text{ kg KPK vrijednosti}}$$

odnosno za 1 kg biomase aktivnog mulja potrebno je 2,2(2,5)-3 kg KPK vrijednosti. Aerobna biološka razgradnja organskih sastojaka iz otpadne vode provodi se reakcijama oksidacije, sinteze i endogene respiracije:



Sustavi za aerobnu razgradnju organskih sastojaka iz otpadne vode pomoću aktivnog mulja mogu primjenjivati aktivni mulj koji se održava u obliku pahuljica raspršenih u vodenom okolišu ili biofilma na raspršenim ili stacionarnim nosačima. Slika 7. prikazuje uronjenu membranu.



Slika 7. Uronjena membrana

Provedba aerobnog procesa obrade otpadne vode aktivnim muljem, brzina provedbe procesa, umnažanje mikroorganizama u aktivnom mulju i učinkovitost procesa pročišćavanja ovisi o nizu čimbenika:

- kakvoći otpadne vode kao hranjivog supstrata
- temperaturi otopljenom kisiku
- koncentraciji toksičnih sastojaka u otpadnoj vodi
- pH-vrijednosti izvanstaničnog okoliša

Mikrobiološka kakvoća aktivnog mulja, odnosno zastupljenost odgovornih vrsta mikroorganizama, njihova aktivnost i sposobnost uvezivanja u zajednicu aktivnog mulja postiže se i održava vođenjem aerobnog procesa po zakonitostima rasta i održavanja biokemijske aktivnosti mikroorganizama aktivnog mulja za aerobni proces uklanjanja otopljenih sastojaka iz otpadne vode. Nakon biološke obrade voda se propušta kroz membrane, koje zadržavaju mikrororganizme i sve zaostale organske i anorganske tvari, a propuštaju vodu visokog stupnja čistoće.

2.2.2. Membranska filtracija

Membranski procesi kao metoda separacije su relativno nov proces jer su prije 30-40 godina bili smatrani tehnološki i ekonomski nezanimljivima. Iako poznavanje principa membranske filtracije seže daleko u povijest šira upotreba membrana ograničena je na posljednjih 40-ak godina, a danas je zauzela vrlo važno mjesto u tehnologiji vode. Pri membranskim filtracijama vodeni medij se u pravilu razdvaja na dva dijela: permeat ili dio koji je prošao kroz membranu i koncentrat odnosno dio vode u kojem zaostaju koncentrirane otopljene tvari. Sam princip membranske filtracije je vrlo jednostavan. Membrana predstavlja barijeru koja ima sposobnost selektivnog propuštanja čestica. Odjeljivanje čestica odvija se zbog njihove međusobne razlike u veličini, obliku ili kemijskoj strukturi zbog kojih je membrana za jedne propusna, a za druge ne. Udio vode u ukupnoj ulaznoj vodi koji se profiltrira kroz membranu naziva se iskorištenje membranskog procesa (Y) i računa se prema jednadžbi (2-2)

$$Y = \frac{Q_p}{Q_u}$$

gdje Q_p predstavlja protok permeata, a Q_u protok ulazne vode. Iskorištenje membranskog procesa ovisi o karakteristikama procesa, cijeni vode koja se filtrira i drugim čimbenicima. Separacijska moć membrane za odjeljivanje čestica odnosno filtrirane tvari izražava se pomoću faktora separacije (R) koji predstavlja udio filtrirane tvari koja se ukloni filtracijom na membrani te se računa prema jednadžbi (2-3)

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_u}$$

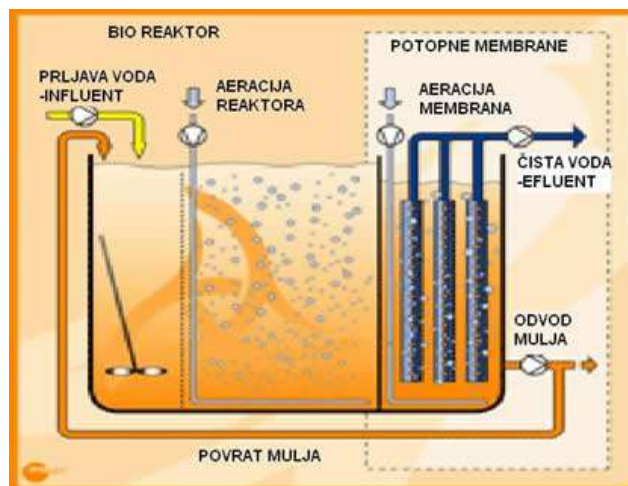
gdje je c_u koncentracija tvari u ulaznoj vodi, a c_p koncentracija tvari u permeatu. Gornja jednadžba za računanje faktora separacije može se upotrijebiti samo ako je koncentracija filtrirane tvari u ulaznoj vodi jednaka po cijeloj površini membrane što je u realnim slučajevima rijetko zbog čega su izvedene brojne druge jednadžbe. Najčešća podjela membranskih procesa je prema veličini pora membrane prema kojoj se dijele na reverznu osmozu (RO), nanofiltraciju (NF), ultrafiltraciju (UF) i mikrofiltraciju (MF).

Tablica 2. Veličine pora ,raspon transmembranskih tlakova i flukseva za različite membranske procese (Mijatović, Matošić, 2012)

Proces	Veličina pora (nm)	Tlak (bar)	Fluks(L m ⁻² h ⁻¹)
MF	>100	0,1-2	>50
UF	5-20	1-5	10-50
NF	1-5	5-20	1,4-12
RO	<1	10-100	0,05-1,4

2.2.3. Prednosti MBR tehnologije

Osnovna prednost primjene MBR tehnologije je činjenica da se radi o relativno malim uređajima, koji na razini primijenjene tehnologije imaju ugrađenu mogućnost tercijarne obrade otpadnih voda, s niskim izlaznim koncentracijama suspendiranih tvari, KPK, BPK₅, amonijaka, TKN i TP (III stupanj pročišćavanja). Nadalje, influenti tj. ulazne komunalne otpadne vode u MBR uređaj mogu biti opterećenije, tj. više onečišćene nego kod klasičnih bioloških sustava, kako zbog membrana kao separacijskih jedinica tako i zbog visoke koncentracije mulja (MLSS - koncentracija aktivnog mulja) i niskog F/M (ulaznog opterećenja po biomasi) koji daje mogućnost velike fleksibilnosti biološkog opterećenja. Kakvoća efluenta koji se postiže MBR postupkom je viša od kakvoće bilo kojeg drugog alternativnog biološkog postupka za obradu otpadnih voda. Stvaranje viška otpadnog mulja u MBR-u je minimalno, a mulj je adekvatno i dobro stabiliziran. Ta značajka omogućuje primjenu obrade otpadnog bio mulja, kao npr. zgušnjavanje. Višak mulja bi normalno bilo oko 0,6 - 0,7 kg mulja po kg ulaznog BPK, ovisno o temperaturi, starosti mulja i zahtjevima na kakvoću efluenta. S MBR tehnologijom te se količine mogu znatno smanjiti, tako da se može očekivati od 0,1 - 0,3 kg mulja/kgBPK (Almes,2014). Aerobni digestor mulja radi tako da razgradi dio tvari u otpadnom mulju nastalom iz MBR procesa. To stabilizira mulj i olakša njegovu daljnju obradu te tako sprječava stvaranje bilo kakvog neugodnog mirisa. Vrijeme retencije je cca 20 dana. Otprilike 50-70% suspendiranih tvari u otpadnom mulju oksidirat će se tijekom aerobne digestije jer je sama starost mulja u MBR vrlo visoka (SRT > 80 dana) (Almes,2014).

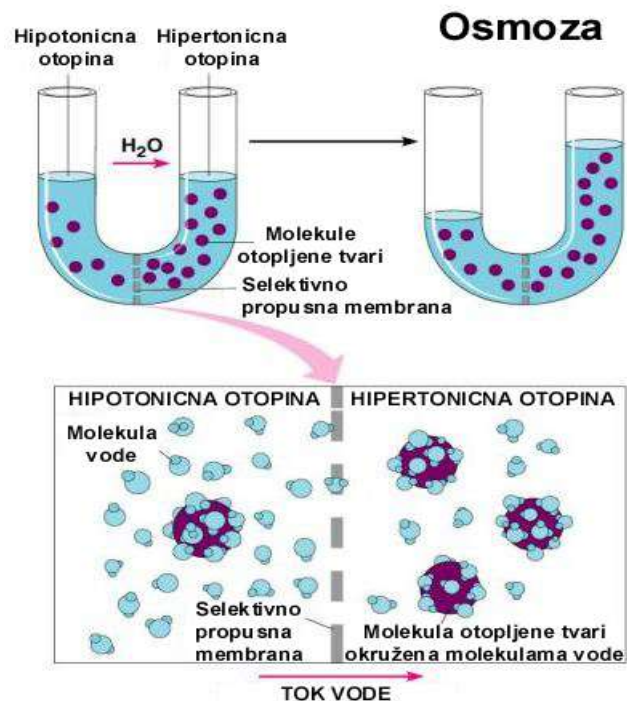


Slika 8. Shematski prikaz rada membranskog bioreaktora (Vanis, 2014)

2.3. REVERZNA OSMOZA

2.3.1. Osmoza

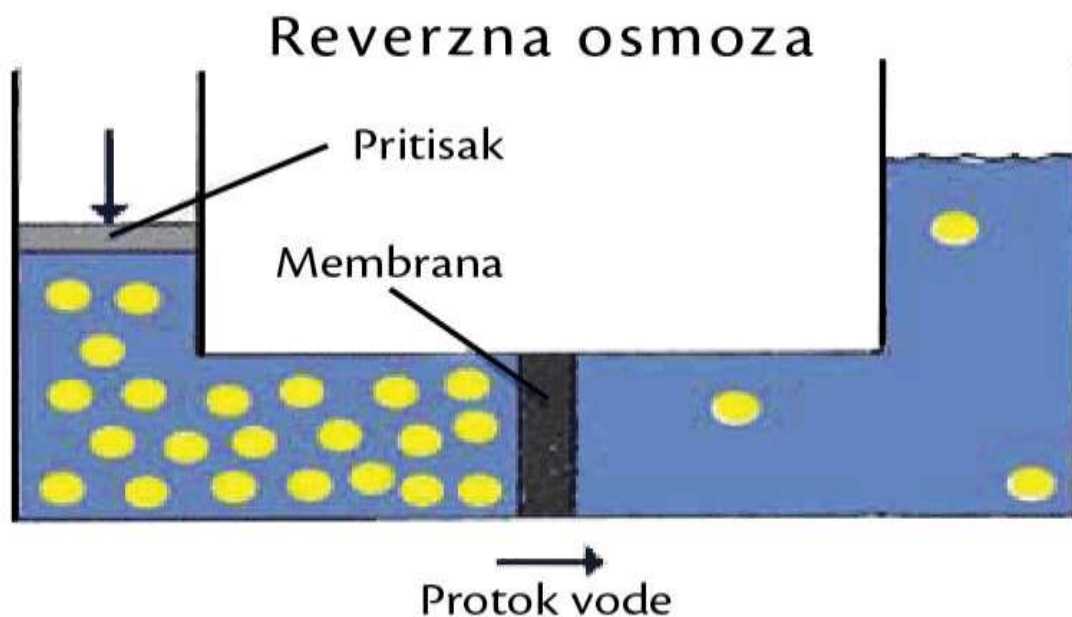
Osmoza je prirodan proces difuzije molekula otapala koja se očituje pri odjeljivanju dviju otopina selektivno polupropusnom membranom (membrana propusna na otapalo, ali ne i na otopljenu tvar). Molekule otapala, zbog razlika u koncentracijama otopljenih tvari (iona ili molekula), teže difuziji iz otopine s nižom (hipotonična otopina) u otopinu s višom koncentracijom otopljene tvari (hipertonična otopina), kako bi se izjednačile koncentracije s obje strane membrane (Slika 9). Osmoza se objašnjava time što otopine s većom koncentracijom sadrže veću količinu slobodne energije, pa budući da polupropusna membrana propušta samo molekule otapala, a ne i otopljene tvari, molekule otapala teže će proći kroz membranu s mjesta veće slobodne energije na mjesto manje. Pri difuziji molekula otapala kroz membranu dolazi do porasta nivoa tekućine na jednoj strani membrane i smanjenja nivoa tekućine na drugoj strani. Porast nivoa tekućine na jednoj strani stvara hidrostatski tlak koji se suprotstavlja osmozi tj. osmotskom tlaku koji djeluje na membranu. Kada se ova dva tlaka izjednače, uspostavit će se ravnoteža i završit će proces difuzije, tj. više neće doći do podizanja nivoa tekućine. Tlak pri kome se uspostavlja ova ravnoteža naziva se efektivni osmotski tlak. Osmotski je tlak veći što je koncentracija otopine veća, i obrnuto.



Slika 9. Prikaz procesa osmoze (E-škola, 2006)

2.3.2.Reverzna osmoza

Reverzna ili povratna osmoza predstavlja obrnuti proces od procesa osmoze. Vanjskim djelovanjem tlaka većeg od osmotskog na otopinu soli, otapalo je prisiljeno da prolazi kroz membranu u smjeru obrnutom od procesa osmoze (Slika 10).



Slika 10. Prikaz procesa reverzne osmoze (Nobel Corporation, 2014)

Protok vode kroz membranu može se izračunati prema jednadžbi:

$$J = K(\Delta P - \Delta \pi)$$

gdje **K** predstavlja permeabilnost membrane za čistu vodu, a ΔP i $\Delta \pi$ razliku tlaka, odnosno osmotskog tlaka vode s obje strane membrane. Kod procesa reverzne osmoze potrebno je uzeti u obzir osmotski tlak jer se u procesu odvajaju otopljene tvari koje značajno utječu na osmotski tlak vode. Procesom RO uklanjanje soli je gotovo potpuno pa se često u računanju izostavi osmotski tlak soli u permeatu i za $\Delta \pi$ uvrstiti samo osmotski tlak ulazne vode. Pri tome treba obratiti pažnju da ulazna voda na membranu podliježe koncentriranju u membranskom modulu tako da ni osmotski tlak ulazne vode nije konstantan te je potrebno upotrijebiti srednju vrijednost osmotskih tlakova na ulaznoj strani membrane zbrojivši osmotski tlak ulazne vode π_u i osmotski tlak koncentrata na izlazu iz membrane π_k

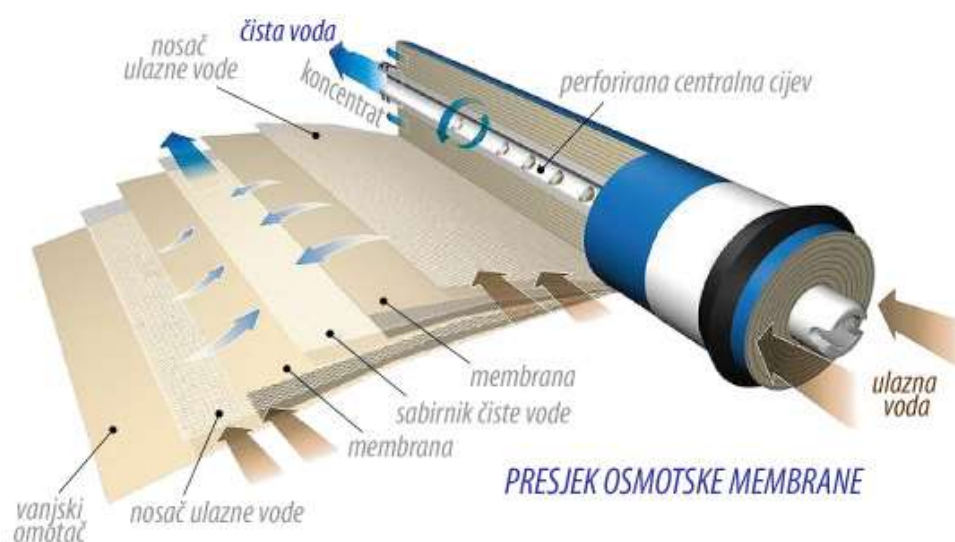
$$\Delta \pi = \frac{\pi_u + \pi_k}{2}$$

Ukoliko se prilikom procesa reverzne osmoze upotrijebi razlika tlaka ΔP manja od osmotskog tlaka $\Delta \pi$ dobiti će se negativna vrijednost protoka vode kroz membranu (J) i voda će teći od strane permeata na stranu ulazne vode kao u procesu obične osmoze. Prilikom proizvodnje membrana za reverznu osmozu povećanje vrijednosti K je od velikog značaja kako bi se dobile membrane visokog kapaciteta. Membrane korištene u procesu reverzne osmoze imaju veličinu pora manju od 1nm. Membrana se sastoji od nekoliko tankih slojeva ili stranica tankog filma koje su zajedno uvijene u spiralnu konfiguraciju oko plastične cjevčice (Slika 11). Kada mlaz vode doprije na površinu membrane, molekule vode prolaze kroz nju i teku kroz spiralu, sakupljajući se u centru cijevi. Prolaz otopljenih tvari kroz membrane je prisutan u većoj ili manjoj mjeri ovisno o samoj membrani i vrsti molekula. Međutim postoje zakonitosti koje vrijede za sve membrane kao što npr. sve membrane bolje zadržavaju viševalentne ione nego jednovalentne. Kao općenito pravilo, membrane dobro zadržavaju tvari u ioniziranom obliku, odnosno kada su hidratizirane. Razlog boljem zadržavanju nabijenih čestica je u veličini čestice s obzirom na hidratiziranost jer nabijene čestice zbog hidrofilnog karaktera oko sebe vežu molekule vode i na taj način im raste veličina. S druge strane, organskim spojevima se u neioniziranom obliku povećava molarna masa, a molekule s molarnom masom većom od 100 se dobro uklanjaju filtracijom kroz membrane za reverznu osmozu, dok one manje prolaze kroz pore membrane u ovisnosti o veličini molekule i veličini pora pojedine membrane.

Tablica 3. Prikaz učinkovitosti membrane RO za pojedine elemente i materijale u postocima (Hydrolux Sistem, 2014)

Materijal/Element	Uklonjeno %	Materijal/Element	Uklonjeno %
Barij	97 %	Kalij	92 %
Bikarbonati	94 %	Radij	97 %
Kadmij	97 %	Selen	97 %
Kalcij	97 %	Silikati	96 %
Kromati	92 %	Srebro	85 %
Bakar	97 %	Natrij	92 %
Deterdženti	97 %	Stroncij	97 %
Fluoridi	90 %	Sulfati	97 %
Olovo	97 %	PCBi	97 %
Magnezij	97 %	Insekticidi	97 %
Nikal	97 %	Herbicidi	97 %

Membrane za proces reverzne osmoze najčešće se proizvode od organskih polimera. Najčešće su u primjeni membrane proizvedene od poliamida, polisulfona i celuloznih estera. Prilikom odabira polimera treba obratiti pažnju da željeni polimer ima što veću sposobnost propuštanja otapala, što veći faktor separacije prema prema filtriranoj tvari, mehaničku otpornost te kemijsku otpornost posebno prema sredstvima za čišćenje membrane.



Slika 11. Presjek membrane za reverznu osmozu (Akvarij.NET, 2013)

Zbog pada cijene membrana zbog masovne proizvodnje i standardizacije dimenzija membranskih modula kao i zbog povećanja cijene vode, upotreba reverzne osmoze za obradu otpadnih voda postaje ekonomski zanimljiva te raste broj velikih postrojenja za reverznu osmozu za obradu otpadne vode.

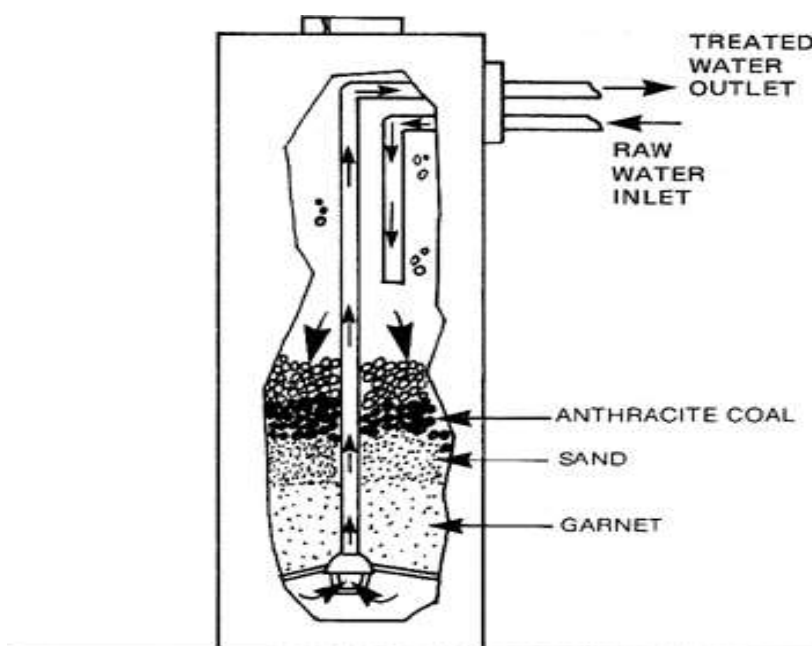


Slika 12. Modul reverzne osmoze (PennySaver, 2014)

2.4. MULTIMEDIJALNI FILTAR

Filtracija je tehnološka operacija razdvajanja heterogene smjese kapljeviti i čvrstih tvari pomoću šupljikave pregrade koja je propusna samo za kapljevinu. Smatra se jednim od najvažnijih postupaka u tehnologiji pripreme vode kojim se čvrste netopljive grubo dispergirane čestice u vodi prolazom kroz neki porozan materijal izdvajaju iz vode. Najčešće se kao filtarsko sredstvo koristi silikatni pijesak različitih granulacija, ali se mogu upotrebljavati i drugi materijali. Danas se uglavnom koriste brzi filtri koji po svojoj konstrukciji mogu biti otvoreni ili zatvoreni, a prema primjeni jednostupanjski ili višestupanjski. Multimedijski filter služi za otklanjanje više različitih tvari u manjim koncentracijama, u istom uređaju. U multimedijskom filtru se pored otklanjanja suspendiranih i koloidnih čestica mogu otkloniti i željezo, mangan i sl. Po konstrukciji se ne razlikuje od standardnih filtara. Multimedijski filter sastoji se od tlačne posude ispunjene s tri ili više sloja filter sredstva, za razliku od konvencionalnog pješčanog filtara koji koristi samo jesan sloj pijeska kao filter sredstvo. U upotrebi su najčešće multimedijski filtri s tri sloja, koji se sastoje od antracita, pijeska i granata (Slika 13). Koristi se upravo kombinacija ova tri materijala zbog razlike u njihovoj specifičnoj masi. Granat je daleko najteži po jedinici

volumena, pijesak je srednji, a antracit je najlakši mediji filtracije. Ideja pomoću ta tri medija različitih gustoća je da se antracit, medij s česticama najveće veličine, nalazi na površini, dok se medij s česticama srednje veličine (pijesak) nalazi u sredini i granat, najteži, ali s česticama najmanjeg promjera nalazi se na dnu. Ovaj raspored filtera medija omogućuje uklanjanje najvećih čestica nečistoće pri vrhu, dok se sve manje i manje čestice nečistoće zadržavaju sve dublje i dublje u medijima. To omogućuje mnogo duže vrijeme rada filtera između dva ispiranja te mnogo učinkovitije uklanjanje nečistoća. Konvencionalan pješčani filter uklanja čestice veličine 25-50 mikrona, dok dobar multimedijalni filter može ukloniti i čestice veličine 10-25 mikrona.



Slika 13. Multimedijalni filter (Farlex,Inc,2014)

2.5. ULTRALJUBIČASTA LAMPA

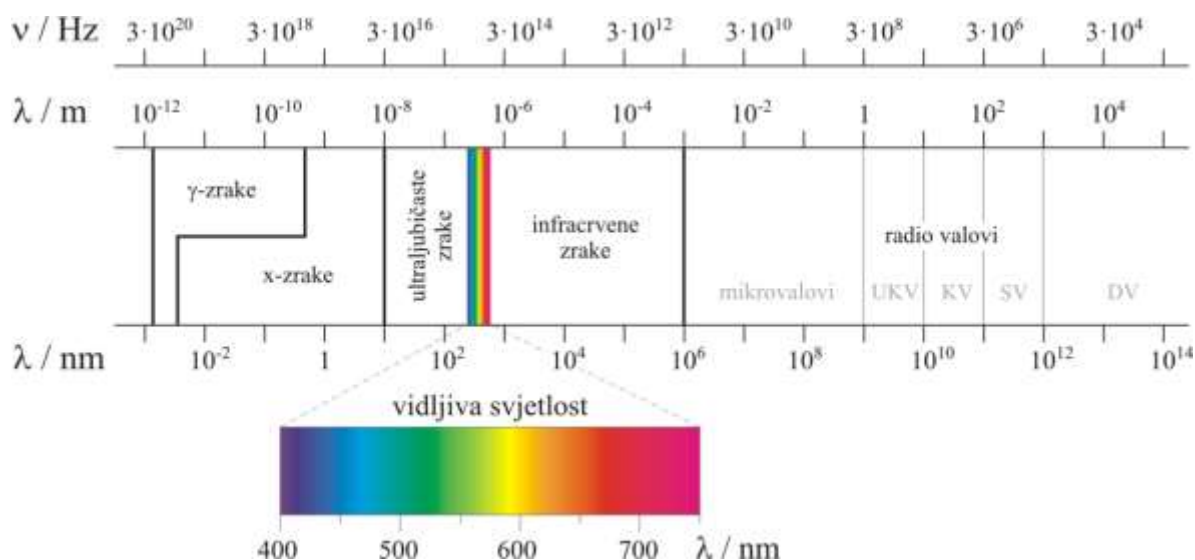
2.5.1. Elektromagnetski spektar

Elektromagnetsko zračenje je fizikalna pojava širenja električnih i magnetskih valova fotonima. Fotoni su čestice bez mase koje se gibaju brzinom svjetlosti (300000 km/s) i sadrže određenu količinu energije. Elektromagnetski valovi svrstani su u elektromagnetski spektar koji se proteže od valova najmanje frekvencije i najveće valne dužine do valova najveće frekvencije i najmanje valne dužine(Slika 14). Energija valova, odnosno fotona, veća je što je

veća frekvencija titraja valova i što je kraća valna dužina. Elektromagnetski spektar dijeli se na dva dijela: neionizirajuće i ionizirajuće zračenje.

Tablica 4. Podjela elektromagnetskog spektra

NEIONIZIRAJUĆE ZRAKE	IONIZIRAJUĆE ZRAKE
radiovalovi	rendgenske (X-zrake)
mikrovalovi	gama zrake
vidljiva svjetlost	kozmičke zrake
infracrvene zrake	
ultraljubičaste zrake	



Slika 14. Elektromagnetski spektar (Eni Generalic, 2014.)

2.5.2. Ultraljubičasto zračenje

Ultraljubičasto zračenje (kratica UV prema eng. *ultraviolet*) obuhvaća elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama manjim od onih koje ima vidljiva svjetlosti, ali većim od onih koje imaju X-zrake, u rasponu od 10 nm do 400 nm. Elektromagnetski spektar ultraljubičastog svjetla se prema valnim duljinama može podijeliti na:

- UV-A : 320-400nm
- UV-B : 280-320nm
- UV-C : 100-280nm.

Sljedeća podjela je prema prijedlogu međunarodnog standarda, koji određuje Sunčevo zračenje (ISO-DIS-21348):

Tablica 5. Podjela elektromagnetskog spektra ultraljubičastog zračenja prema prijedlogu međunarodnog standarda

Naziv područja	Skraćenica	λ (nm)	Energija po fotonu
Ultraljubičasto A ili dugovalno	UVA	400 nm-315 nm	3,10-3,94 eV
Blisko UV	NUV	400 nm-300 nm	3,10-4,13 eV
Ultraljubičasto B ili srednjevalno	UVB	315 nm-280 nm	3,94-4,43 eV
Srednje UV	MUV	300 nm-200 nm	4,13-6,20 eV
Ultraljubičasto C ili kratkovalno	UVC	280 nm-100 nm	4,43-12,4 eV
Daleko UV	FUV	200 nm-122 nm	6,20-10,2 eV
Vakuumsko	VUV	200 nm-100 nm	6,20-12,4 eV
Duboko UV	LUV	100 nm-88 nm	12,4–14,1 eV
Super UV	SUV	150 nm- 10nm	8,28–124 eV
Ekstremno UV	EUV	121 nm-10 nm	10,2–124 eV

2.5.3. Dezinfekcija vode UV zračenjem

Poznato je da UV zračenje štetno djeluje na ljudsko zdravlje, međutim ono ima i brojne korisne primjene ovisno o valnoj duljini:

- 240-280 nm: Dezinfekcija, uništenje najvećeg broja neželjenih mikroorganizama na površinama i u vodi
- 250-300 nm: Forenzička analiza, otkrivanje lijekova i droga
- 270-300 nm: Analiza bjelančevina, DNA redoslijed, pronalaženje lijekova
- 280-400 nm: Medicinsko snimanje stanica
- 300-400 nm: Svjetleće UV diode (LED), organske svjetleće UV diode (OLED) i polimerne svjetleće UV diode (PLED)
- 300-365 nm: Očvršćivanje polimera i sušenje tonera u tisku
- 300-320 nm: Fotokemoterapija u medicini

Kao što je gore navedeno UV zračenje ima primjenu u dezinfekciji vode. Ozračivanjem vode ultraljubičastim zrakama valne duljine 200-295 nm, voda se dezinficira u roku od nekoliko sekundi jer UV zrake razaraju protoplazmu bakterijskih stanica. Dezinfekcija vode primjenom UV zračenja vrši se pomoću kvarcne lampe sa živinom parom ili pomoću lampi u kojima su pomiješani plemeniti plinovi i živina para. Lampe se postavljaju u struju vode ili izvan nje, a voda koja se podvrgava UV zračenju mora biti potpuno bistra kako bi prodor UV zraka bio što bolji. Ova metoda dezinfekcije ima niz prednosti u odnosu na dezinfekciju vode primjenom kemijskih preparata, međutim ima i nekoliko nedostataka zbog kojih se gotovo uvijek upotrebljava u kombinaciji s drugim uređajima.

Tablica 6. Prednosti i nedostaci dezinfekcije vode UV zračenjem

PREDNOSTI	NEDOSTACI
U vodu se ne dodaju kemikalije	Voda mora biti bistra
Ne mijenjaju se svojstva vode	Koncentracija suspendiranih tvari u vodi mora biti manja od 10 mg/l
Ne mijenja se kemijski sastav vode	Nedostatak pouzdanih pokazatelja za kontrolu učinka dezinfekcije
Kratko vrijeme dezinfekcije	Mogućnost pregrijavanja lampe ukoliko se postavi iznad vode
Mala potrošnja energije	Taloženje kamenca na lampi ukoliko je smještena u vodi
Jednostavno rukovanje	

Zrake valne duljine 200-295 nm imaju najjače baktericidno djelovanje s maksimumom djelotvornosti oko 260 nm te je stoga glavna karakteristika dobre UV lampe sposobnost zračenja u UV-C spektru. UV-C zračenje ubija prvenstveno bakterije, ali uništava i sporogene oblike i patogene protozoe. Proces inaktivacije mikroorganizama se može prikazati jednadžbom (2-6):

$$N = N_0 \times e^{-\frac{Ext}{K}}$$

gdje su N_0 i N koncentracije mikroorganizama na početku procesa dezinfekcije i nakon vremena t , E je fluksni intenzitet baktericidnog zračenja u mW cm^{-1} , a K rezistentnost bakterija. U vodi su prisutni razni mikroorganizmi koji posjeduju različitu otpornost na bakteriocidno djelovanje UV zraka te stoga koeficijent K u jednadžbi ovisi o vrsti bakterijske vrste. Vrijednost koeficijenta K određuje se za vegetativne oblike stanica, bakterijske spore i patogene bakterije. Rezistentnost *Escherichia coli* iznosi 2500 te je vrijednost ovog koeficijenta preporučena za izračunavanje količine energije potrebne za baktericidnu dezinfekciju. U tom slučaju dezinfekcijski učinak koji je karakteriziran omjerom N/N_0 izračunava iz tog omjera za *coli* bakterije. Otpornost bakterijskih spora je viša od vrijednosti za *Coli* bakterije, ali je njihova relativna koncentracija u vodi obično niska. Potrebna količina baktericidne energije za uginuće spora je 2-3 puta veća od energije potrebne za inaktivaciju bakterija. Doza zračenja je količina zračenja potrebna za inaktivaciju pojedinih mikroorganizama te se ona izražava kao umnožak snage UV lampe i vremena ozračivanja po jedinici ozračenosti površine. Najčešće se izražava u mW cm^{-2} ili u mJ cm^{-2} . Snaga UV lampe izražava se u Wattima, a u upotrebi su tzv. UV lampe visokog tlaka para unutar lampe (400-7000 W) i UV lampe niskog tlaka para unutar lampe (10-200 W). Fluks UV zračenja je veličina koja se izražava u mW cm^{-2} te predstavlja snagu lampe po jedinici površine ozračivanja i za UVC zračenje iznosi od 0,2 do 10 mW cm^{-2} . Fluks UV zračenja pomnožen s vremenom ozračivanja daje dozu zračenja. Potrebne doze zračenja za bistru vodu kreću se u rasponu od 15-40 mJ cm^{-2} .

Tablica 7. Doze UV zračenja potrebne za 1-log inaktivacije pojedinih mikroorganizama (Mijatović, Matošić, 2012)

Mikroorganizam	Doza UV (mJ cm^{-2})
<i>Bacillus subtilis</i> (spore)	12,0
<i>Hepatitis A virus</i>	11,0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5,5
<i>Streptococcus faecalis</i>	4,5
<i>Legionella pneumophilla</i>	2,04

Učinak dezinfekcije vode ovisi o produktu intenziteta baktericidnog ozračivanja E s vremenom ozračivanja t , odnosno o količini baktericidne energije potrošene u procesu. Iz navedenog je vidljivo da se isti učinak može postići slabim intenzitetom ozračivanja i dugim vremenom ekspozicije ili jakim intenzitetom ozračivanja uz kratko vrijeme ekspozicije. Prilikom određivanja potrebne količine baktericidne energije, treba uzeti u obzir adsorpciju energije prilikom prolaska kroz vodu. Intenzitet fluksa radijacijske energije u optički homogenoj supstanci (mW cm^{-2}) je izražen Lambert-Bouguerovim zakonom:

$$E = E_0 e^{-\alpha x}$$

gdje je E_0 intenzitet fluksa radijacije koja pada na površinu supstance (mW cm^{-2}), α adsorptivnost (cm^{-1}), a x debljina adsorptivnog sloja (cm). Adsorptivnost vode α ovisi o sastavu vode, odnosno o njoj boji, mutnoći te koncentraciji željeza prisutnog u vodi. Dezinfekcija vode UV zračenjem preporuča se za dezinfekciju vode nakon procesa pročišćavanja vode ili za dezinfekciju podzemnih voda koje su obično čiste. U skladu s time UV lampa u „Membrain“ kući služi kao mjera opreza da se osigura uništenje eventualno prisutnih mikroorganizama u vodi iz spremnika čiste vode. Koristi se UV lampa niskog tlaka para unutar lampe jačine 10 W.



Slika 15. UVC lampa(Nobel Corporation, 2013)

3. ZAKLJUČAK

Voda je dio čovjeka, njegova života i civilizacije. Voda služi za održavanje biljnog, životinjskog i ljudskog života na Zemlji. S obzirom da voda predstavlja resurs koji nam stoji na raspolaganju u ograničenim količinama pametno gospodarenje vodom trebalo bi postati opće pravilo prihvaćeno od svih dijelova društva. Kao što je već ranije u uvodu spomenuto Hrvatska raspolaže velikim količinama pitke vode te opskrbljuje oko 80% svog stanovništva vodom iz javnog vodovoda. Međutim problem predstavljaju nepristupačna područja, otoci, nacionalni parkovi, parkovi prirode i strogi rezervati. Svjesni tog problema kao i problema nedostatka pitke vode u brojnim zemljama svijeta tim studenata Sveučilišta u Zagrebu u sklopu projekta Membrain, uz pomoć profesora mentora osmislio je i instalirao sustav za obradu otpadne vode za tročlano kućanstvo. Kombinacijom tehnologije membranskog bioreaktora i reverzne osmoze koji čine glavne dijelove sustava dobiva se zatvoreni krug vode kroz kuću. Sakupljanjem kišnice te pročišćavanjem sive i crne vode smanjuje se iskorištavanje prirodnih resursa te se postiže 78%-tna reciklacija vode.

Tablica 8. Bilanca vode i prikaz uštede vode za tročlano kućanstvo

ULAZNA VODA			MBR			RO		
Vodovodna voda	Pročišćena voda	Kišnica	Ulazna voda	Pročišćena voda	Izlazna voda	Ulazna voda	Pročišćena voda	Izlazna voda
25 L	350 L	98 L	473 L	463 L	10 L	463 L	350 L	113 L
Ukupna ulazna voda			473 L			100 %		
Ukupna izlazna otpadna voda			123 L			26%		
Reciklirana pročišćena voda			350 L			78%		

Instalacijom ovog sustava u tročlanom kućanstvu dnevna potrošnja vode može se smanjiti s 450L na 20L, odnosno na količinu vode potrebnu za piće. Na taj način osim što se čuva pitka voda kao vrijedan i ograničen prirodni resurs, štedi se i novac. U današnje doba, doba nestašice pitke vode u brojim zemljama svijeta, voda je postala veoma skup proizvod te upravo iz tog razloga navedeni sustav ima i ekonomski značaj.

Tablica 9. Cijena vode u kunama

Količina vode	Cijena [kn]
1000 L	20
450 L	9
20 L	0,4

Iz podataka u Tablici 9. vidi se da bi se instalacijom sustava dnevno uštedjelo 8,6 kn, tj. da je mjesečna ušteda 258 kn odnosno 3139 kn godišnje. Pročišćena voda je kvalitete destilirane što znači da je potrebna manja količina sapuna za postizanje istog efekta pjenjenja te nije potrebna upotreba sredstava protiv kamenca u perilicama za rublje i posude što također predstavlja uštedu novca. Pročišćena voda kruži kroz kuću i njena temperatura je viša od temperature vodovodne vode. Temperatura pročišćene vode iznosi oko 25 °C, dok je temperatura vodovodne vode oko 14 °C. Za zagrijavanje pročišćene vode potrebno dovesti manje topline što predstavlja još jedan oblik uštede novca. Isplativost ulaganja u ovakav sustav ovisi i o cijeni tehnologije i opreme i isplativije je kad se radi na većim sustavima kao što su naselja ili gradovi.

Dakle, instaliranjem sustava za obradu otpadne vode koji je kombinacija membranskog bioreaktora u kojem se provodi aerobna razgradnja aktivnim muljem i membranskog procesa reverzne osmoze štedi se :

- pitka voda
- upotreba sapuna i sredstava protiv kamenca
- toplina potrebna za zagrijavanje vode
- novac

4. LITERATURA

1. Agape Water Solutions (2014) , < <http://www.agapewater.com/>>. Pristupljeno 23.kolovoza 2014.
2. Almes (2014) Almes-eko d.o.o., < <http://www.almes.hr/index.php>>. Pristupljeno 20.kolovoza 2014.
3. AQUA (2014) Aqua d.o.o., < <http://www.aqua.hr/main/aqua> >. Pristupljeno 23.kolovoza 2014.
4. Baker, R.W. (2004) Membrane Technology and Applications, 3rd ed., Wiley, England.
5. Coulson, J.M., Richardson, J.F., Backhurst, J.R., Harker, J.H. (1978) Chemical Engineering, 3rd ed., Pergamon Press, Oxford.
6. Encyclopedia Britannica,Inc. (2014) , <<http://www.britannica.com/>> . Pristupljeno 20.kolovoza 2014.
7. E-škola (2006) E-škola mladih znanstvenika, <<http://e-skola.biol.pmf.unizg.hr>>. Pristupljeno 30.kolovoza 2014.
8. Farlex, Inc. (2014) The free dictionary by Farlex, <<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/multimedia+filter>>. Pristupljeno 20.kolovoza 2014.
9. Generalic, E. (2014) Periodni sustav elemenata, <<http://glossary.periodni.com/rjecnik>>. Pristupljeno 20.kolovoza 2014.
10. Glancer-Šoljan, M., Landeka Dragičević, T., Šoljan, V., Ban, S. (2002) Biološka obradba otpadnih voda, Interna skripta, (Ed. Kugler), Zagreb.
11. Hockberger, P. E. (2002) A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms, Photobiol **76**, 561-579
12. Hydrolux Sistem (2014) Hydrolux Sistem d.o.o., <www.hydrolux.info>. Pristupljeno 21.kolovoza 2014.
13. Ježek, D. (2007) Filtracija, Inženjerstvo III, Interna skripta, Zagreb.
14. Landeka Dragičević, T. (2013) Biotehnologija u zaštiti okoliša, Interna skripta, Zagreb.

15. Matošić, M. (2014) Membranski bioreaktori u zaštiti okoliša, Interna skripta, Zagreb.
16. Metcalf & Eddy Inc. (1991) Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse, 2nd ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York.
17. Mijatović, I., Matošić, M. (2012) Tehnologija vode, Interna skripta, Zagreb.
18. Milanović inženjering (2014), <www.miing.rs>. Pristupljeno 22.kolovoza 2014.
19. Mulder, M. (1996) Basic Principles of Membrane Technology, 3rd ed., Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
20. Nobel Corporation (2014), < <http://www.nobel.ba/home/> >. Pristupljeno 30.kolovoza 2014.
21. Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (2013) *Narodne novine* **80**, Zagreb (NN 80/2013)
22. Radjenović, J, Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., Barcelo, D. (2008) Membrane bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
23. Šivak, M. (2002) Tehnologija pripreme tehničkih voda u termoenergetici, Marijan Šivak, Zagreb.
24. VANIS Ltd (2014) VANIS Industrial Automation, <www.vanis.hr>. Pristupljeno 30.kolovoza 2014.
25. Wang, Z., Wu, Z., Yin, X., Tian, L. (2007) Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: Membrane foulant and gel layer characterization, *Journal of Membrane Science*, 325, 238-244
26. Water Environment Federation (1996) Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of practice No.11, Fifth ed., Water Environment Federation, Alexandria, USA.
27. WaterProfessionals (2014) WaterProfessionals, <www.waterprofessionals.com>. Pristupljeno 24.kolovoza 2014.
28. Waugh, A.; Grant, A. (2007) Anatomy and Physiology in Health and Illness, 11th ed., Ross and Wilson, Edinburgh.

