

## BIOLOŠKI FILTRI U AKVAKULTURI

I. Šarić, M. Brailo, A. Gavrilović, J. Jug-Dujaković

### Sažetak

Recirkulacijska akvakultura jedno je od rješenja za ekološki održivu i ekonomski isplativu proizvodnju, a može se smjestiti bilo u urbanim bilo u ruralnim sredinama. Kontrolirani uvjeti omogućuju održavanje optimalnih uzgojnih uvjeta prilagođenih uzgajanoj vrsti tijekom cijeloga proizvodnog procesa i skraćivanje proizvodnog ciklusa u odnosu na otvorene nekontrolirane sustave. Recirkulacijski sustavi trenutačno su među najistraživanijim područjima akvakulture, a biofiltracija, odnosno otklanjanje amonijaka kao otrovnoga produkta probave bjelančevina, jedna je od njihovih najvažnijih komponenti. Cilj je ovog rada prikazati važnost biološke filtracije u recirkulacijskim sustavima i opisati osnovne tipove i dizajne biofiltara koji se rabe u akvakulturi. Danas se u komercijalnim i istraživačkim sustavima upotrebljava više tipova biofiltara koji se međusobno razlikuju u odabiru radnog organizma, principu rada, veličini, materijalu izradbe i sl. Svi biofiltri imaju svoje prednosti i nedostatke, te područje najbolje primjene. Za pravilan je odabir uz dobro poznavanje njihovih značajki nužno dobro poznavati i sve specifičnosti dizajna i funkcioniranja recirkulacijskog sustava u koji se ugrađuju.

**Ključne riječi:** akvakultura, biofiltracija, biofiltri

### UVOD

Zbog prevelikog izlova prirodnih ribljih fondova u zadnjih nekoliko desetljeća velik dio hrane morskog i slatkovodnog podrijetla dolazi iz uzgoja. Ograničene količine vode, utjecaj na okoliš, cijena zemljišta, kvaliteta vode, povećan broj bolesti i sl., prisiljavaju uzgajivače i istraživače na primjenu intenzivnijih i ekološki prihvatljivijih uzgojnih tehnologija. Recirkulacijski uzgojni sustavi te-

Ivo Šarić, student, Marina Brailo, dipl. ing. asistent, Mr. sc. Ana Gavrilović, asistent, Sveučilište u Dubrovniku, Odjel za akvakulturu, Ćira Carića 4, 2000 Dubrovnik, Hrvatska, e-mail: marina.brailo@unidu.hr, e-mail: ana.gavrilovic@unidu.hr;

Dr. sc. Jurica Jug-Dujaković, direktor, Tehnološki i poslovno-inovacijski centar za marikulturu, MARIBIC, Bistrina bb, 20230 Ston, Hrvatska, e-mail: jurica.jug-dujakovic@unidu.hr

stiraju se i razvijaju posljednjih tridesetak godina. Nakon uspješnih inicijalnih pokusa primarni fokus postao je kreiranje i komercijalizacija recirkulacijske tehnologije koja je kadra proizvoditi ribu i ostale vodene organizme na ekonomski kompetitivnoj osnovi. Uspješan dizajn i menadžment recirkulacijskog uzgojnog sustava ujedinjava različite tehnologije za pročišćavanje i kretanje vode, te za kontrolu i održavanje optimalne kakvoće vode prilagođene uzgajanoj vrsti. Pojedinačni procesi uključuju mehaničke, biološke, električne, elektroničke i kemijske komponente koje omogućuju recirkulaciju i više od 90% uzgojnog volumena vode na dan te tako štede i bitno smanjuju potrebu za izmjenom vode u akvakulturnim postrojenjima (Goldburg et al., 2001). Uzimajući u obzir te vrijednosti, te mogućnost održavanja optimalne razine otopljenog kisika u zatvorenim sustavima, dolazimo do toga da je moguće održavati velike uzgojne gustoće na dosta ograničenu prostoru uz intenzivnu proizvodnju tijekom cijele godine (Van Gorder, 1994). Također se u takvim zatvorenim kontroliranim sustavima postiže bolja konverzija hrane, što znači da manje otpada nastalog hranjenjem odlazi u okoliš (Van Gorder i Jug-Dujaković, 1996; Losordo et al., 1998). Budući da se sva voda u uzgojnim prostorima neprestano pročišćava i sterilizira, sustav nije izložen mogućim negativnim utjecajima iz otvorenih voda, kao što su unos uzročnika bolesti, predatora, različitih oblika kontaminacije, odnosno posljedica industrijske polucije. Kreiranje različita mineralnog sastava i kvalitete uzgojne vode omogućuje uzgoj slatkovodnih, boćatih i morskih organizama.

Kontrolirani uvjeti omogućuju održavanje optimalnih uzgojnih uvjeta prilagođenih uzgajanoj vrsti tijekom cijeloga proizvodnog procesa, kao i skraćivanje proizvodnog ciklusa u odnosu na otvorene nekontrolirane sustave.

Recirkulacijski sustavi trenutačno su među najistraživanijim područjima akvakulture, a biofiltracija, odnosno otklanjanje amonijaka kao otrovnoga produkta probave bjelančevina, jedna je od njihovih najvažnijih komponenti.

### *ODRŽAVANJE KVALITETE VODE U RECIRKULACIJSKIM SUSTAVIMA*

Sustav za održavanje kvalitete vode u recirkulacijskome uzgojnom postrojenju sastoji se od niza komponenti. Sva postrojenja nemaju jednake potrebe za pročišćavanjem vode, nego to ovisi o više čimbenika od kojih su najvažniji: kakvoća i količina vode (postotak izmjene vode u sustavu u jedinici vremena) koja ulazi u sustav, uzgojne gustoće, uzgajana vrsta, količina i sastav hrane koja ulazi u sustav, način upravljanja farmom. S pomoću tih čimbenika određujemo koje ćemo komponente (i kakve kvalitete) uključiti u sustav, a koje nećemo. Ipak, svaki recirkulacijski sustav uključuje, uz crpke i uzgojne tankove, nekoliko osnovnih komponenti koje omogućuju pročišćavanje uzgojne vode i njezinu ponovnu uporabu. To su u prvom redu komponenta za mehaničko pročišćavanje vode, odnosno otklanjanje fekalija i nepojedene hrane, bio-

filtrar kao komponenta za nitrifikaciju, odnosno oksidaciju amonijaka, komponenta za sterilizaciju, odnosno inaktivaciju patogenih mikroorganizama, te komponenta za oksigenaciju, odnosno održavanje optimalne količine otopljenog kisika (Timmons i Losordo, 1994; Timmons et al., 2001). Ako je riječ o zatvorenijim sustavima, u kojima se izmjenjuje minimalna količina vode (manje od 20% vode u sustavu na dan), sustav mora uključivati komponentu za održavanje optimalne pH-vrijednosti dodatkom lužine i komponentu za otplinjavanje viška ugljikova dioksida. Potpuno zatvoreni sustavi moraju sadržavati i komponente za denitrifikaciju i defosforizaciju (Timmons et al., 2001).

Biofiltrar je samo jedna od komponenti, pa njegova učinkovitost ovisi o prisutnosti i učinkovitosti drugih komponenti.

## BIOFILTRACIJA

Biološka filtracija u akvakulturi općenito podrazumijeva svaku vrstu filtracije koja se koristi živim organizmima za uklanjanje otopljenih nečistoća iz vode.

Dušik je esencijalan nutrijent za sve žive organizme koji nalazimo u proteinima, nukleinskim kiselinama, adenzin fosfatima, nukleotidima i pigmentima (Hagopian i Riley, 1998.). U akvakulturi dušik ponajprije gledamo kao sastavni dio otpadnih produkata uzgajanih organizama. Imamo četiri osnovna izvora dušičnog otpada: izlučine organizama (ureja, feces), otpad nastao raspadanjem mrtvih organizama, nepojedena hrana i atmosferski dušik (Wheaton et al., 1991). Proces uklanjanja amonijaka biofiltrarom zove se nitrifikacija, a sastoji se od oksidacije amonijaka do nitrita i konačno do nitrata. Proces kojim se u anaerobnim uvjetima nitrati prevode u plinoviti dušik naziva se denitrifikacijom.

Amonijak u organizmu ribe nastaje kao jedan od krajnjih produkata metabolizma proteina i izlučuje se škragama i bubrezima. Pojavljuje se u dva oblika: neionizirani  $\text{NH}_3$  i ionizirani  $\text{NH}_4^+$ . Njihova pojedinačna koncentracija u vodi ovisi o pH, temperaturi i slanosti (Anthonisen et al., 1976). Porast pH i temperature uzrokovat će i povećanje koncentracije neioniziranog amonijaka, koji je iznimno toksičan za ribu. S druge strane, ako smanjimo pH, povećat će se koncentracija  $\text{NH}_4^+$  koji je relativno neškodljiv za ribu.

Nitriti ( $\text{NO}_2^-$ ) međuprodukti su u procesu nitrifikacije amonijaka do nitrata. Oni se obično prevode u nitrate čim nastanu, ali, ako se pojavi nedostatak kisika potrebnog za njihovu oksidaciju, koncentracije nitrita mogu doseći razine toksične za ribu. Njihovo se štetno djelovanje očituje u krvotoku, gdje nitriti oksidiraju željezo na hemoglobinu proizvodeći tako metahemoglobin, spoj karakteristične smeđe boje koji uzrokuje bolest smeđe krvi kod riba (Tomasso et al., 1979).

Nitrati ( $\text{NO}_3^-$ ) konačni su produkt nitrifikacijskoga procesa i najmanje su toksični od svih dušičnih spojeva. U recirkulacijskim sustavima razine se ni-

trata obično kontroliraju svakodnevnim izmjenama vode, osim pri intenzivnijem uzgoju ili slaboj izmjeni vode, kada se javlja potreba za denitrifikacijom.

Cijeli proces nitrifikacije zbija se u organizmu bakterija nasadenih na bio-filtru. Postoje dvije skupine bakterija koje zajednički obavljaju nitrifikaciju. Obje skupine kategoriziramo kao kemosintetske autotrofne bakterije, jer energiju dobivaju iz anorganskih spojeva, za razliku od heterotrofnih koje energiju dobivaju iz organskih spojeva (Hagopian i Riley, 1998). Oksidaciju amonijaka do nitrita obavljaju bakterije rodova *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* i *Nitrosovibrio*. Oksidaciju nitrita do nitrata obavljaju rodovi *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* i *Nitrospina*. Nitrifikacijske bakterije su obligatni autotrofi i aerobi, što znači da im je CO<sub>2</sub> primarni izvor ugljika i da im je za rast potreban kisik (Hagopian i Riley, 1998).

Na biofiltrima nitrifikacijske bakterije obično dijele prostor s heterotrofnim mikroorganizmima (bakterije, protozoa) koji metaboliziraju organske spojeve. Oni rastu dosta brže od nitrifikacijskih bakterija i lako ih nadvladaju u kompeticiji za prostor i kisik. Da bi se ovakva situacija izbjegla, potrebno je ukloniti što više krutih organskih čestica iz vode prije nego što ona uđe u bio-filtar.

Količina amonijaka koju će filtarska nitrifikacijom ukloniti najviše ovisi o broju bakterija koje obavljaju nitrifikaciju. Dakle, što je veća površina podloge filtra, na njoj će rasti i više bakterija, što znači da će i veća količina amonijaka biti uklonjena.

Ukupni dušični otpad u sustavu izražava se kao ukupni amonijakalni dušik, UAN, a označuje ukupnu količinu ioniziranog i neioniziranog amonijaka u vodi. Količina ukupnoga amonijakalnog dušika koju filtarska ukloni po jedinici površine podloge u danu je stopa nitrifikacije, a izražava se u kg<sub>UAN</sub>/m<sup>2</sup>dan. Za pješčane i granularne filtre stopa se nitrifikacije izražava u kg<sub>UAN</sub>/m<sup>3</sup>dan jer je kod tih filtara mnogo lakše odrediti volumen nego površinu podloge.

Osnovni čimbenici koji utječu na efikasnost nitrifikacije:

1. pH utječe na efikasnost nitrifikacije i odnos između ioniziranog i neioniziranog amonijaka. Najnovija istraživanja pokazuju da je optimalan raspon pH za rast nitrifikacijskih bakterija između 7,2 i 7,8. U biofiltrima se pH obično održava u većem rasponu između 6 i 9, kako bi se bakterije prilagodile stvarnim uvjetima. Nagle promjene pH od 0,5 do 1,0 u nekoliko minuta mogu štetno djelovati na rad filtra i bit će potrebno neko vrijeme da se prilagodi novim uvjetima. Proces nitrifikacije snižava pH vode pa je vrlo bitno njegovo održavanje da ne bi došlo do lošeg utjecaja na rad filtra.

2. Temperatura ima značajnu ulogu u nitrifikacijskom procesu. Pad od 10 °C radne temperature uzrokuje 50%-tno smanjenje efikasnosti uklanjanja. Nitrifikacijske bakterije podnose širok temperaturni raspon, samo im treba omogućiti dovoljno vremena za prilagodbu (Jones i Morita, 1985).

3. Alkalinitet je mjera puferskog kapaciteta uzgojne vode. Sa svakim gramom oksidiranog amonijaka gubi se oko 7 g kalcijeva karbonata koji je potrebno nadoknaditi. Nadoknađujemo ga dodavanjem karbonata ili izmjenom vode.

4. Kisik je često limitirajući čimbenik u biofiltrima zbog slabog unosa ili prevelike potrošnje koju uzrokuju heterotrofne bakterije. Da bi se održavala maksimalna stopa nitrifikacije, potrebno je unositi bar 2 mg/L kisika u biofiltrar (Wheaton, 1985).

5. Amonijak, tj. njegova koncentracija, izravno utječe na učinkovitost nitrifikacije. Na niskim je koncentracijama nitrifikacija razmjerna koncentraciji amonijaka u vodi. Ipak, visoke koncentracije neioniziranog amonijaka inhibiraju rast bakterija. Koncentracije od 10 do 150 mg/L inhibiraju rast *Nitrosomonas*, a 0,1–1 mg/L inhibira rast *Nitrobacter* (Anthonisen et al., 1976).

## BIOFILTRI

Biološki su filtri dijelovi opreme koja radnim organizmima pruža optimalan prostor, te uvjete za rast i razvoj kako bi oni mogli učinkovito obavljati svoju zadaću, nitrifikaciju. Tako bi idealan biofiltrar trebao odstraniti 100% ulaznog amonijaka bez zadržavanja nitrita, zauzimati relativno mali prostor, ne zadržavati krute čestice, biti jeftin u izradbi i u održavanju. Nažalost, takav idealan model ne postoji, te se danas u komercijalnim i istraživačkim akvakulturnim sustavima rabi više tipova biofiltara koji se međusobno razlikuju u odabiru radnog organizma, principu rada, veličini, materijalu izradbe, a svaki ima svoje prednosti i nedostatke. S obzirom na odabir radnog organizma, biofiltre možemo podijeliti na biljne i bakterijske, a, s obzirom na njegov rast, na one s pričvršćenom i one s raspršenom biomasom.

Biljni biofiltri s pričvršćenom biomasom, odnosno sustavi u kojima nitrifikaciju provodi višestanično, makroskopsko, vodeno bilje, pokazali su se vrlo isplativima, pogotovo ako se koriste komercijalno vrijednim vrstama biljaka. Razlog rijetke primjene ovakvih sustava u akvakulturi, zasigurno, leži u nemogućnosti njihove kontrole i upravljanja (Jug — Đuković et al., 2009).

Biljni biofiltri s raspršenom biomasom sustavi su u kojima nitrifikaciju provode jednostanične, mikroskopske, vodene biljke, i to u samome uzgojnom prostoru (*greenwater* tehnika). Nekim ribljim vrstama to odgovara jer podnose slabiju kakvoću vode, a i koriste se algama kao dodatkom prehrani (npr. tilapija). Ovakva tehnika može biti vrlo isplativa za neke vrste, ali upravljanje takvim sustavima zahtijeva određeno iskustvo. Bakterijske biofiltre s raspršenom biomasom nazivamo i sustavima s aktivnim muljem jer bakterije s vremenom zajedno s heterotrofnim mikroorganizmima prisutnima u vodi formiraju nakupine (flokule, pahuljice) na kojima se provode različiti metabolički procesi. Slično *greenwater* sustavima, u ovim se sustavima nitrifikacija odigrava i izravno u bazenu s uzgajanim organizmima u kojima se flokule ak-

tivnog mulja održavaju raspršenima u stupcu vode nekom vrstom aeracije ili miješanja. Ovakvi se sustavi ne primjenjuju često u akvakulturi zbog nedostataka poput nepredvidljivosti razvoja različitih bakterijskih populacija, potrebe za velikom količinom kisika, te miješanja vode koje sprječava razvoj anaerobnih bakterija. Sve to otežava održavanje kvalitete uzgojne vode.

Bakterijski biofiltri s pričvršćenom biomasom sustavi su u kojima bakterije rastu na odgovarajućoj podlozi u obliku tankog filma pa ih nazivamo biofilmskim filtrima. Biofilmske filtre, s obzirom na način osiguranja dostatne količine kisika za obavljanje procesa nitrifikacije, možemo podijeliti na uronjene i potopljene. Osnovna razlika između ovih dviju skupina jest u tome što je podloga za rast bakterija kod potopljenih biofiltara stalno pod vodom, dok je kod uronjenih povremeno i na zraku, odnosno povremeno izranja, što izravno utječe na način održavanja optimalne količine biofilma na samoj podlozi (Malone i Pfeiffer, 2006). Biofilmski filtri najčešće se primjenjuju u akvakulturi, napose u recirkulacijskim sustavima, a, osim razlika u osiguranju dostatne količine kisika potrebnog za obavljanje procesa nitrifikacije, principu rada, načinu održavanja optimalne količine biofilma, odabiru podloge za rast bakterija i sl., svi imaju nekoliko zajedničkih značajki (Timmons et al., 2001):

1. Prazni prostor — volumen unutar filtra koji nije zauzet podlogom za rast bakterija. Što je taj prostor veći, manja je mogućnost začepjenja filtra.

2. Poprečni presjek — dio filtra ili ulazna cijev u filter, postavljen u smjeru protoka vode. Presjek, odnosno promjer određuje nam količinu vode koja će u određenom vremenu proći kroz filter.

3. Stopa hidrauličnog opterećenja — volumen vode koji će proći kroz poprečni presjek filtra u jedinici vremena pod određenim tlakom. Obično se izražava u  $m^3/m^2$  dan. Svaki biofilter ima predodređenu minimalnu i maksimalnu stopu hidrauličnog opterećenja.

4. Specifična površina — površina podloge filtra po volumenu jedinice. Što je specifična površina veća, to je veća količina bakterija koja može rasti na određenoj podlozi, a time i veća količina amonijaka može biti uklonjena.

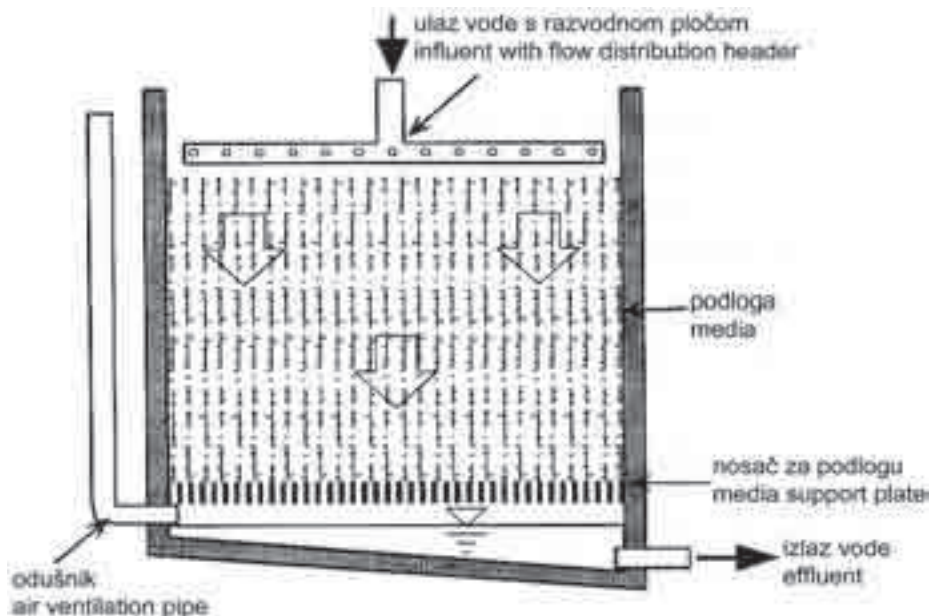
Navedenim značajkama koristimo se kao smjernicama pri dizajniranju i dimenzioniranju efikasnog biofiltra, pri čemu slijedimo nekoliko koraka:

- određivanje količine ukupnog amonijakalnog dušika, koja iznosi oko 3% količine hrane, što znači da se na kilogram metabolizirane hrane koja sadržava 40% bjelančevina proizvede 0,03 kg čistog amonijaka
- određivanje volumena pijeska ili granula kod pješčanih ili granularnih filtara, te određivanjem površine medija kod RBK, prokapavajućih ili potopljenih fiksnih filtara
- određivanje dubine sloja pijeska ili granula, a računa se na 200 — 300% inicijalnog volumena pijeska ili granula prije početka obrastanja bakterijskim populacijama
- određivanje izmjene vode u sustavu, odnosno protoka vode u sustavu.

Osnovna značajka uronjenih biofilmskim filtara jest da je podloga izložena i zraku i vodi pa je bakterijama dostupan kisik iz zraka, kao i onaj otopljen u vodi. Kod tih biofiltara održavanje optimalne količine biofilma osigurano je kompeticijom među bakterijama. Biofilm raste sve dok bakterije u njegovu najdonjem sloju ne odumru zbog nedostatka kisika i hrane, nakon čega se oljušti, a na podlogu se nasele nove bakterije.

Prokapavajući filtar (Slika 1) jedan je od najstarijih tipova uronjenih biofilmskih filtara, napravljen još u 19. st. za tretiranje kanalizacijskih otpadnih voda. Osnovni dizajn tih filtara sastoji se od jednog ili više slojeva podloge u spremniku iznad kojeg se raspršuje otpadna voda. Voda potom prolazi, odnosno »curi ili prokapava« kroz podlogu filtra u tankome sloju koji omogućuje kontakt s nitrifikacijskim bakterijama na podlozi i skuplja se u spremniku ispod njega. Izradba i upravljanje takvim filtrima vrlo je jednostavno. Osnovni je problem odabir prave podloge. Tijekom godina mnogo je različitih materijala služilo za izradbu medija. U početku su to bili sitno drobljeni kamen ili ugljen, a u današnje se doba kao najbolji materijal preporučuju blokovi izrađeni od listova grubog PVC-a slijepljenih zajedno. Dobra je strana uporabe takvih blokova u tome što ne trebamo spremnik za medij, što nosi značajnu uštedu sredstava. Blokovi se jednostavno mogu složiti na prikladne okvire ili čak na ravnu površinu, a mogu se postaviti i izravno iznad uzgojnih bazena. Prokapavajući filtri imaju sposobnost uklanjanja velikih količina amonijaka, a, ako su dobro napravljeni, mogu djelovati i kao solidan mehanički filtar. Nemaju potrebe za prozračivanjem jer se voda ne zadržava u mediju, nego samo prolazi kroz njega, tako da je dodirna površina vode i zraka dosta velika. To omogućuje bakterijama dostatnu količinu kisika za nitrifikaciju, a učinkovito je i uklanjanje CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i ostalih neželjenih plinova. Stopa nitrifikacije koja se postiže kod prokapavajućih biofiltara s PVC podlogom iznosi 0,1–0,9 g/m<sup>2</sup>dan (T i m m o n s et al., 2001). Kod dizajna posebnu pozornost treba obratiti na način distribucije vode na vrhu filtra. Ona se može riješiti na dva načina. Prvi je raspršivanje vode pod tlakom, a drugi je uporaba perforirane cijevi ili posude iz koje će voda zbog gravitacije kapati po mediju. Prvi je način učinkovitiji, ali i skuplji. Osnovni nedostatak takvih filtara jest velik potrošak energije za pumpanje vode na vrh filtra. Ako izradimo visok i uzak filtar, uštedjet ćemo na prostoru, ali će nam potrošnja energije biti veća. S druge strane, ako izradimo nizak i širok filtar, uštedjet ćemo na energiji za pumpanje, ali će nam zauzeti mnogo više prostora.

U uronjene biofilmske filtre ubrajamo i rotirajuće biološke kontakte (RBK) od kojih je najčešći biodisk (Slika 2). On se sastoji od niza okruglih ploča naslaganih na horizontalnu osovinu. Diskovi su uglavnom izrađeni od neke vrste plastike i tvore površinu za rast bakterija. Cijela je konstrukcija postavljena u cilindrični spremnik koji je djelomično ispunjen vodom. Voda se nalazi u razini osovine ili malo ispod nje, tako da je 40–50% filtra uronjeno u vodu. Filtar se okreće s pomoću motora, a brzina rotacije dosta je niska, oko 1–2 min<sup>-1</sup>. Rotacija se treba prilagoditi tako da bakterije naizmjenice budu

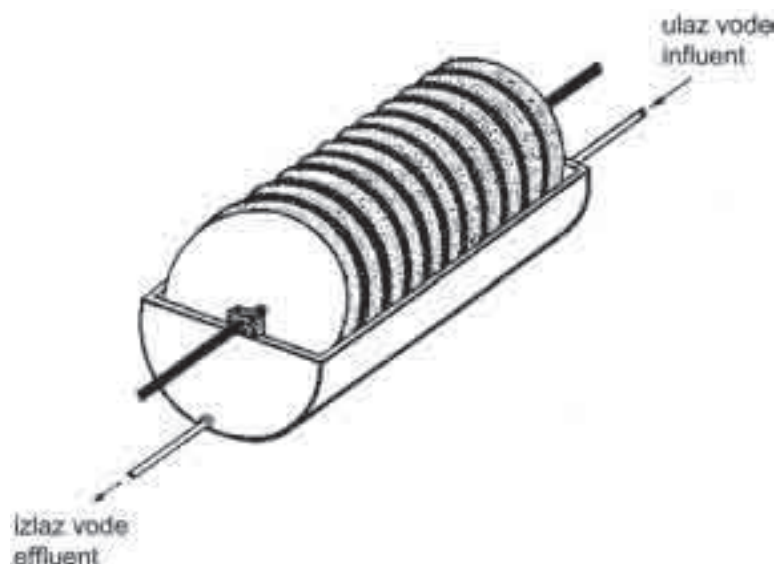


Slika 1. Shematski prikaz prokapavajućeg filtra (Timmons et al., 2001)  
Figure 1. Schematic of a trickling filter with a rotary water distribution arm (Timmons et al., 2001)

izložene zraku i vodi s dušičnim otpadom (Timmons et al., 2001). Ploče za nasadivanje bakterija naslagane su na određenoj udaljenosti jedna od druge, tako da se dobije maksimalna specifična površina a da se pritom ne ometa protok vode. Ploče najčešće nisu ravne, nego su valovita oblika kako bi se osigurala dodatna funkcionalna površina. Protok vode kod takvih filtara ide duž osovine i nema prevelike potrebe za pumpanjem, nego čak može ići i gravitacijski ako je dizajn sustava prilagođen. Prednosti su RBK nad drugim tipovima filtara brojne: sam se aerira, nema potrebe za dodavanjem kisika i ne ovisi o koncentraciji kisika u vodi, teško se začepi, ima male energijske zahtjeve. Kad se jednom pokrene, RBK uglavnom radi vrlo pouzdano i vrlo učinkovito uklanja velike količine amonijaka u više opterećenim sustavima (Van Gorder i Jug-Dujaković, 2005). Jedini veći nedostatak spomenutih filtara jest mogućnost mehaničkih kvarova kao što je pucanje osovine, kvar motora i sl. Novi modeli koji se okreću s pomoću protoka vode odnosno zraka i ne ovise o električnoj energiji, jedan su od najefikasnijih biofilitarskih dizajna sa stopom nitrifikacije od 312 g/m<sup>3</sup>dan, odnosno 1,21 g/m<sup>2</sup>dan (Van Gorder i Jug-Dujaković, 2005).

Osnovna značajka potopljenih biofilmskih filtara jest da je podloga za rast bakterija u potpunosti pod vodom, odnosno da je bakterijama dostupan samo kisik otopljen u vodi. S obzirom na pokretljivost podloge, takve filtre možemo podijeliti na one s fiksnom i na one s manje ili više pokretnom podlogom, što



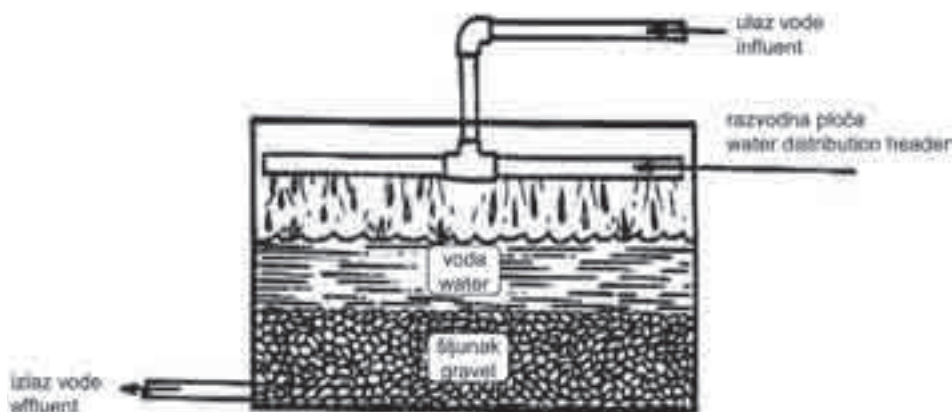


Slika 2. Shematski prikaz rotirajućega biološkog kontaktora (preuzeto s [www.aquanic.org](http://www.aquanic.org))

Figure 2. Schematic of a rotating biological contractor (from [www.aquanic.org](http://www.aquanic.org))

se očituje i u načinu održavanja optimalne količine biofilma na podlozi (Malone i Pfeiffer, 2006).

Filtar s fiksnom, statičnom podlogom tipičan je primjer potopljenog biofiltra, a sastoji se od spremnika s podlogom u potpunosti prekrivenom vodom. Protok vode može biti usmjeren odozgo, odozdo ili horizontalno. Takvi filtri mogu ili ne moraju biti aerirani. Ako je put vode kroz filtar dulji, dobro je imati aeraciju jer će se sav kisik potrošiti do izlaza. Kod biofiltara s fiksnom podlogom dolazi do ljuštenja biofilma kada bakterije u najdonjemu sloju biofilma odumru zbog nedostatka kisika i hrane, nakon čega se naseljavaju nove bakterije. Loša strana tih filtara jest u tome što se bakterije stalno nalaze pod vodom i ona im je jedini izvor kisika. Također je nužno ispirati filtar zbog nakupljanja krutih čestica. Stari su sustavi (Slika 3) kao podlogu rabili šljunak i imali su mnogo nedostataka — bili su preveliki, preteški, lako su se začepljivali i imali su premalo praznoga prostora. Moderni potopljeni filtri s fiksnom podlogom koji se rabe u akvakulturi uvelike se razlikuju od starih tipova, jednostavni su za izradbu i održavanje i vrlo su učinkoviti. Glavna je razlika izbor podloge i smjer protoka vode. U modernim potopljenim filtrima kao podloga se rabe PVC blokovi (slično kao kod prokapavajućih) i protok je vode horizontalan. Najčešće se takvi filtri izrađuju u obliku izduljenih horizontalnih spremnika u koje se slažu blokovi podloge (slično *raceway* sustavu). Raspored spremnika i blokova može biti dosta različit, u biti slažemo ih kako

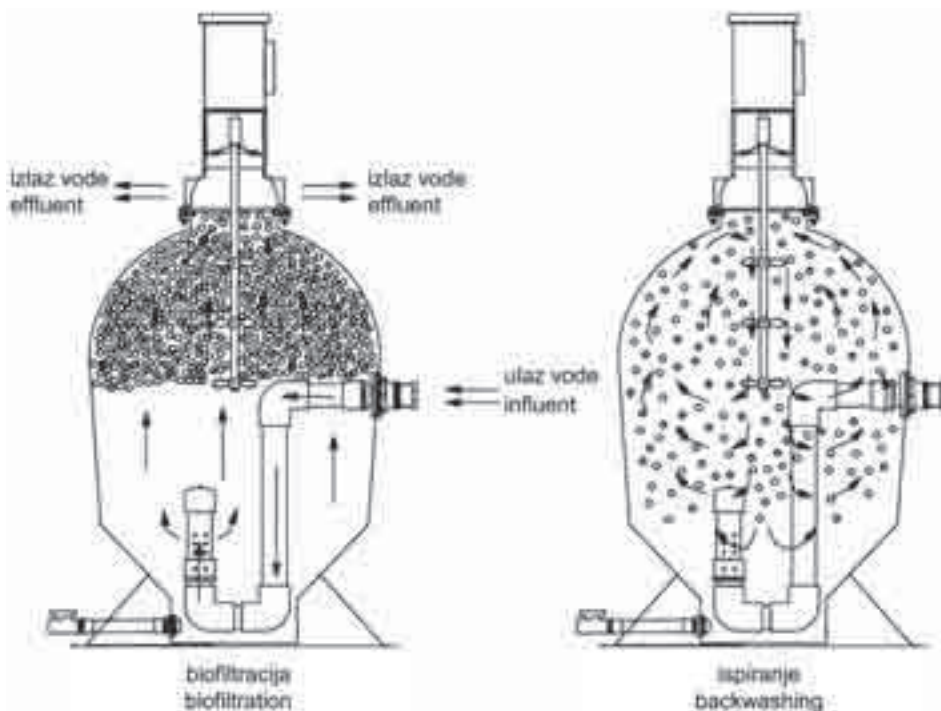


Slika 3. Shematski prikaz potopljenog filtra sa šljunčanom podlogom (preuzeto s [www.aquanic.org](http://www.aquanic.org))

Figure 3. Schematic of a submerged gravel filter (from [www.aquanic.org](http://www.aquanic.org))

nam više odgovara. Drugi način izradbe jest postavljanje blokova u vertikalno postavljen spremnik s konusnim ili ravnim dnom, te aeracijom. S pomoću aeratora postiže se kruženje vode u spremniku i bolja opskrba kisikom. Dobra je strana ovakvog dizajna manje zadržavanje krutih čestica i više kisika za bakterije. Također postoji i mogućnost postavljanja filtra izravno u uzgojne baze, pa nema potrebe za spremnikom. Problem je što je u ovom slučaju teško ukloniti veće krute čestice prije ulaska vode u filter. Stopa nitrifikacije koja se postiže kod potopljenih biofiltera s fiksnim PVC blokovima podloge iznosi 0,3–0,7 g/m<sup>2</sup>dan (Suhr i Pedersen, 2010).

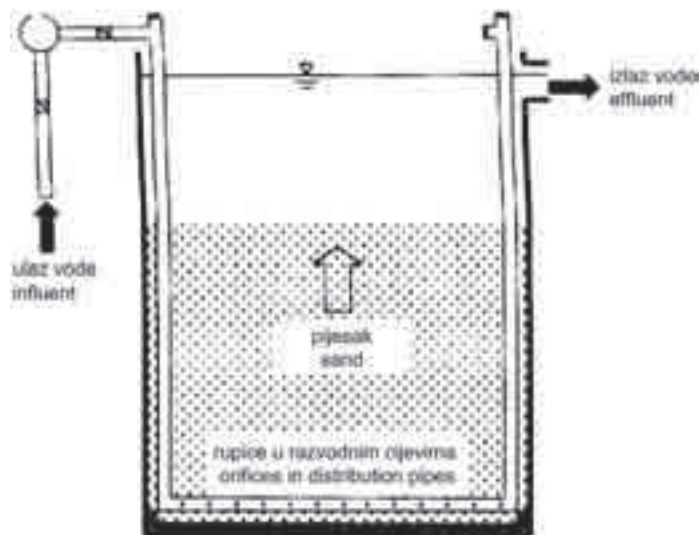
U filtre s pokretnom podlogom ubrajamo najveći broj biofiltera koji se upotrebljavaju u komercijalnim i istraživačkim akvakulturnim sustavima. U takvim se filterima upotrebljuje različita podloga za naseljavanje bakterija, od pijeska do plastičnih granula oblika kugle, kotača, zrna riže i slično. Filtre u kojima se odabrana podloga povremeno giba strujom vode, upuhivanjem zraka ili miješalom nazivamo ekspandirajućim filterima. Najstariji tip ekspandiranog filtra, odnosno filtra s kontinuirano pokretnom, fluidiziranim podlogom je pješćani biofilter (Slika 4). Osnovna značajka, a ujedno i glavna prednost takvih filtera u odnosu na druge jest velika specifična površina podloge — sitnih zrnaca pijeska. Filter je zatvoreni prostor, izvana obično cilindričnog, izduljenog oblika s ulazom vode odozdo. Bit je tog filtra da su zrnca pijeska uvijek raspršena u vodi u takozvanom fluidiziranom sloju i da se što manje dodiruju, jer se tako povećava funkcionalna površina za nitrifikaciju. Da bi se teški medij poput pijeska podigao i održavao pokretnim, potrebna je velika količina i brzina vode, što povećava tlak unutar samog kućišta filtra, odnosno uzrokuje pad tlaka u samom sustavu. Dobre značajke pješćanih filtera jesu: sadržavaju



Slika 4. Shematski prikaz granularnog filtra (Malone et al., 1998)  
 Figure 4. Schematic of a bead filter (Malone et al., 1998)

najveću biološki aktivnu površinu po danom volumenu u usporedbi s drugim vrstama filtara, zauzimaju malo prostora zbog svog oblika (izduljeni cilindrični), sami se čiste i relativno su tolerantni na visoke unose nutrijenata. Ipak, pješčani filtri imaju i neke nedostatke. Brzina ulaska vode u filter mora biti idealno prilagođena. Ako je protok prejak, može se dogoditi da izbacij zrnca pijeska izvan filtra. U dizajn filtra nije uključena aeracija ili oksigenacija, tako da je sav kisik dostupan bakterijama donesen vodom. Manjak kisika rješava se isključivo povećanjem protoka, što označuje povećan potrošak energije. Za miješanje pijeska potreban je značajan protok vode i stalno pumpanje, što čini dodatni trošak. Početna investicija za pješčane filtre nije velika jer su dosta jednostavne konstrukcije, ali u proizvodnji su velik potrošač energije. Upotrebom plastičnih granula umjesto pijeska možemo smanjiti trošak pumpanja vode bez negativnog utjecaja na učinkovitost nitrifikacije. Za fluidizirani pješčani biofilter zabilježena je stopa nitrifikacije od 85 do 1 600 g/m<sup>3</sup>dan, a za fluidizirani granularni biofilter od 66 do 542 g/m<sup>3</sup>dan (Guerdat et al., 2010).

U ekspanzirajućim filterima optimalna se količina biofilma održava zahvaljujući trenju među granulama i odumiranju bakterija u najdonjemu sloju bio-



Slika 5. Shematski prikaz pješčanog filtra (Timmons et al., 2001)  
Figure 5. Schematic of a fluidized sand filter (Timmons et al., 2001)

filma uzrokovanog nedostatkom kisika i hrane. Filtri s povremeno pokretnom, odnosno ekspanzirajućom podlogom, katkad su dizajnirani za obavljanje dviju funkcija, mehaničke i biološke filtracije. Podloga kod ove vrste filtera različite su granule manje gustoće od vode koje plutaju unutar filtra, pa ih nazivamo i plutajućim granularnim biofiltrima. Materijal od kojeg su granule izrađene najčešće je polietilen, a veličine variraju uglavnom od 3 do 5 mm. Podloga granularnog filtra također ima dosta veliku specifičnu površinu za rast bakterija. Mehanička je filtracija dosta učinkovita kod tih filtera. Sposobni su uklanjati čestice manje od 20 mikrona. Veće čestice zaustavlja debeli sloj granula, a finije se čestice lijepe za biofilm na njihovoj površini. Voda u filter ulazi odozdo. Pri dnu i pri vrhu filtra postavljene su dvije perforirane ploče koje služe za zaustavljanje granula. Dok filter radi, granule se nalaze u fluidiziranom sloju priljubljene uz gornju ploču koja im ne dopušta da isplutaju iz filtra (Slika 5). Značajka toga filtra jest da ga se u određenim intervalima treba ispirati (zbog krutih čestica). Filtri manjeg volumena obično se ispiru tako da se zaustavi protok vode i potom se kompletan volumen vode isprazni, dok granule ostaju na donjoj ploči. Filtri većeg volumena za ispiranje se koriste propelerom ili upuhivanjem zraka. Princip je taj da se zaustavi protok vode i potom se dobro izmiješa voda koja je ostala u spremniku zajedno s granulama. Pri tom se krute otpadne čestice odvajaju od granula i tonu prema dnu spremnika gdje se istalože i uklanjaju u koncentriranom obliku (manji potrošak vode). Obavljanje dvostruke funkcije ujedno je i negativna strana takvog filtra. Često ispiranje uklanja biofilm s granula i uzrokuje prekid procesa biofiltracije. Pritom

se zbog velikog unosa organskog otpada povećava količina heterotrofnih bakterija na mediju koje kompetiraju za prostor s nitrifikacijskim bakterijama. Granularni se filtri ne aeriraju pa ovise o kisiku unesenom vodom. Količina energije potrebna za pumpanje vode čini skupima za veće sustave, pa se zato uglavnom upotrebljavaju u uzgajalištima s manjim opterećenjem. Guerdat et al. (2010) za plutajući su granularni filter utvrdili stopu nitrifikacije od 48 do 1 231 g/m<sup>3</sup>dan.

## ZAKLJUČAK

Biološki su filtri komponente koje zbog velike površine čine optimalno stanište za bakterije koje svojom metaboličkom aktivnošću uklanjaju nečistoće otopljene u vodi. Proces uklanjanja amonijaka biofiltracijom zove se nitrifikacija, a sastoji se od oksidacije amonijaka do nitrita i konačno do nitrata. Efikasnost procesa ovisi o temperaturi, količini otopljenog kisika, pH-vrijednosti, alkalitetu i samoj koncentraciji amonijaka. Biofilter mora biti dizajniran tako da u potpunosti oksidira amonijak izračunan na osnovi pretpostavljene količine hrane, a da pritom ima i određeni sigurnosni višak raspoložive površine za rast bakterija. Učinkovitost biofiltra ovisi o njegovu pravilnom dizajnu te o prisutnosti i učinkovitosti drugih komponenti u sustavu. Postoji više tipova biofiltera koji se razlikuju po veličini, materijalu izradbe, odabiru podloge za rast bakterija i principu rada. S obzirom na odabir radnog organizma, biofiltre možemo podijeliti na biljne i bakterijske, a s obzirom na njegov rast, na one s pričvršćenom i one s raspršenom biomasom. Bakterijski biofiltri s pričvršćenom biomasom sustavi su u kojima bakterije rastu na odgovarajućoj podlozi u obliku tankog filma pa ih nazivamo biofilmskim filterima. S obzirom na način osiguranja dostatne količine kisika za obavljanje procesa nitrifikacije, možemo ih podijeliti na uronjene i potopljene. Osnovna razlika između ovih dviju skupina jest u tome što je podloga za rast bakterija kod potopljenih biofiltera stalno pod vodom, dok je kod uronjenih povremeno i na zraku, odnosno povremeno izranja, što izravno utječe na način održavanja optimalne količine biofilma na samoj podlozi. Biofilmski filtri najčešće se primjenjuju u akvakulturi, napose u recirkulacijskim sustavima. Osim razlika u osiguranju dostatne količine kisika potrebnog za obavljanje procesa nitrifikacije, principu rada, načinu održavanja optimalne količine biofilma i odabiru podloge za rast bakterija, svi imaju nekoliko zajedničkih značajki, kao što su poprečni presjek, stopa hidrauličnog opterećenja i specifična površina, koje se rabe kao osnova pri dimenzioniranju i dizajniranju. Svi poznati dizajni imaju svoje prednosti i nedostatke, te područje najbolje primjene. U literaturnim podacima nailazimo na različite vrijednosti stopa nitrifikacije za različite biofiltre, ali i različite stope nitrifikacije za isti tip biofiltra, što opet svjedoči o specifičnostima svakoga pojedinog sustava.

## Summary

### BIOFILTERS IN AQUACULTURE

I. Šarić, M. Brailo, A. Gavrilović i J. Jug–Dujaković

Recirculating aquaculture is one of the solutions to an environmentally sustainable and economically feasible aquaculture production, and can be established in either urban or rural communities. Controlled conditions enable optimal growth conditions suitable for the species in question during the whole growth process, as well as the shortening of the process itself, when compared to open uncontrolled systems. Recirculating systems are now one of the most researched fields of aquaculture, and biofiltration as the reduction of the poisonous ammonia compounds generated by digestion of proteins, is one of its most important parts. The aim of this study was to stress the importance of biofiltration, and to describe different designs of biofilters. Many biofilters are being used in commercial and research aquaculture facilities with differences in choice of working organism, design, material, price and etc. For the proper choice of biofilter it is necessary to know characteristics of each recirculating aquaculture system, because there are still no strict criteria for categorizing and applying different biofilter designs.

**Keywords:** aquaculture, biofiltration, biofilters

#### LITERATURA

- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., Srinath, E. G. (1976): Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 48, 835–852.
- Goldburg, R. J., Elliott, M. S., Naylor, M. A. (2001): *Marine Aquaculture in the United States: Environmental Impacts and Policy Options*. Pew Oceans Commission. Arlington, VA, 44 pp.
- Guerdat, T. C., Losordo, T. M., Classen, J. J., Osborne, J. A., DeLong, D. P. (2010): An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Eng.*, 42, 38–49.

---

Ivo Šarić, student, Marina Brailo, dipl. ing. asistent, e-mail: marina.brailo@unidu.hr, MSc Ana Gavrilović, assistant, University of Dubrovnik, Department of Aquaculture, Čira Carića 4, 2000 Dubrovnik, Hrvatska, e-mail: ana.gavrilovic@unidu.hr; Dr. sc. Jurica Jug–Dujaković, director Business and innovation centre for mariculture, MARIBIC, Bistrina bb, 20230 Ston, Croatia, e-mail: jurica.jug-dujakovic@unidu.hr

- Hagopian, D. S., Riley, J. G. (1998): A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacult. Eng.*, 18, 223–244.
- Jones, R. D., Morita, R. Y. (1985): Low temperature growth and whole cell kinetics of a marine ammonium oxidizer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 21, 239–243.
- Jug–Dujaković, J. Gavrilović, A., Skaramuca, B. (2009): . U: Zbornik abstrakta Trećeg međunarodnog savjetovanja o slatkovodnom ribarstvu Hrvatske: Uzgoj slatkovodne ribe, stanje i perspektive, Hrvatska gospodarska komora — Sektor za poljoprivredu, poljoprivredu, prehrambenu industriju i šumarstvo, Hrvatska gospodarska komora — Županijska komora Vukovar (ur.).
- Losordo, T. M., Masser, M. P., Rakocy, J. E. (1998): Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: An Overview of Critical Considerations. SRAC Publication No. 451. USDA, 6 pp.
- Malone, R. F., Beecher, L. E., DeLos Reyes, A. A. Jr. (1998): Sizing and Management of Floating Bead Bioclarifiers. In: Libey, G. S. Timmons, M. B., (Eds.). Proceedings of the second international conference on recirculating aquaculture. Virginia Polytechnic Institute and State University. Roanoke, Virginia, 319–341.
- Malone R. F., Pfeiffer T. J. (2006): Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Eng.*, 34, 389–402.
- Suhr, K. I., Pedersen, P. B. (2010): Nitrification in moving bed and fixed bed biofilters treating effluent water from a large commercial outdoor rainbow trout RAS. *Aquacult. Eng.*, 4, 231–37.
- Timmons, M. B., Losordo, T. M. (1994): *Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering, Design and Management*. Elsevier. Amsterdam, 333 pp.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. (2001): *Recirculating Aquaculture Systems*. Cayuga Aqua Ventures. Ithaca, NY, 647 pp.
- Tomasso, J. R., Sinco, B. A., Davis, K. B. (1979): Chloride inhibition of nitrite-induced methemoglobinemia in channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *J. Fish. Res. Board Can.*, 36, 1141–1144.
- Van Gorder, S. D. (1994): Operating and managing water reuse systems. In: Timmons, M. B., Losordo, T. M. (Eds.). *Aquaculture water reuse systems: Engineering design and management*. Developments in aquaculture and fisheries science, 27, 281–306.
- Van Gorder, S. D., Jug–Dujakovic, J. (1996): The effects of feed management on design and production capacity of recirculating aquaculture systems. Proceedings from Recirculating aquaculture conference. Roanoke, Virginia, 390–398.

- Van Gorder, S. D., Jug-Dujakovic, J. (2005): Performance Characteristics of Rotating Biological Contactors Within Two Commercial Recirculating Aquaculture Systems. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 6, 23–38.
- Wheaton, F. W. (1985): *Aquaculture Engineering*. Robert E. Krieger Publishing Company Inc.
- Wheaton, F. W., Hochheimer, J. N., Kaiser, G. E., Kranes, M. J. (1991): *Principles of Biological Filtration*. Proceedings from the Aquaculture Symposium. Cornell University. Ithaca, New York, April 4–6, 1991.

Primljeno: 19. 7. 2010.  
Prihvaćeno: 20. 10. 2010.