



M. Vuković Domanovac\*

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb

## Proces s aktivnim muljem

**P**roces s aktivnim muljem svrstava se u skupinu bioloških postupaka pročišćavanja otpadnih voda koji se odvijaju u prisustvu kisika. Svi aerobni biološki postupci temelje se na principima samopročišćavanja, kao temeljnog svojstva prirodnog okoliša. Ljudskim djelovanjem, uvođenjem kisika u otpadnu vodu te stvaranjem velike aktivne površine pomoću pahuljica aktivnog mulja, postiže se u kratkom vremenu intenzivno pročišćavanje voda. Princip pročišćavanja sastoji se u uzgoju mikroorganizama i stvaranju povoljnih uvjeta za njihov rast i razvoj.

Proces aktivnog mulja trenutačno je najčešće primjenjivan biološki postupak pročišćavanja otpadnih voda u razvijenom svijetu. S tehnno-ekonomskog stajališta nadmašuje sve druge biološke postupke pročišćavanja otpadnih voda, a uspjeh se očituje u visokom učinku cjelokupnog sustava.

### Povijesni pregled

Napori engleskih inženjera, kemičara i mikrobiologa doveli su do osmišljavanja procesa s aktivnim muljem. Krajem 19. stoljeća u Engleskoj se razvijala ideja o pročišćavanju otpadnih voda aeracijom u prisustvu mikroorganizama. Provedeni eksperimenti nisu dali zadovoljavajuće rezultate. Tek je Amerikanac Clarke 1912. godine (Lawrence, Massachussets) uspio dobiti znatno smanjenje potrošnje kalijeva permanganata kada je otpadnu vodu aerirao u prisustvu mikroorganizama. Slična istraživanja između 1912. i 1914. godine provodili su Ardern i Lockett (Manchester, Engleska), koji su dobili visoke vrijednosti pročišćavanja primjenom aktivne mase, odnosno aktivnog mulja kojeg su nakon taloženja ponovno vraćali u proces. Naime, provedbom šaržnih aeracijskih pokusa primijećeno je da se otpadna voda ne može pročititi samo aeriranjem, već da je pročišćavanje potrebno provoditi zajedno s aktivnim muljem i živim organizmima koji se u njemu nalaze. Kad se aeriranje smjese otpadne vode i mulja prekine, aktivni mulj se taloži, a supernatant se time oslobađa od onečišćenja.

Prelazak na kontinuirani proces sastojao se od taloženja aktivnog mulja u sekundarnom taložniku koji se nastavljao na aeracijski spremnik, uz izvedeni povratni tok aktivnog mulja u aeracijski spremnik. Prekomjerna količina aktivnog mulja koji nastane u navedenom procesu tretira se kao višak mulja i redovito se odvodi iz taložnika. U svrhu uklanjanja onečišćenja iz otpadne vode, proces s aktivnim muljem se proširuje procesima nitrifikacije, denitrifikacije i uklanjanja fosfora.

Od osmišljavanja krajem 19. stoljeća i početka primjene u 1913. godini proces je široko prihvaćen i dalje se razvija, što mu daje jedinstvenu fleksibilnost u radu.

### Aktivni mulj

Aktivni mulj predstavljaju mikroorganizmi čija se aktivnost može prikazati kao biološki proces, a za uspješnu kontrolu potrebno je

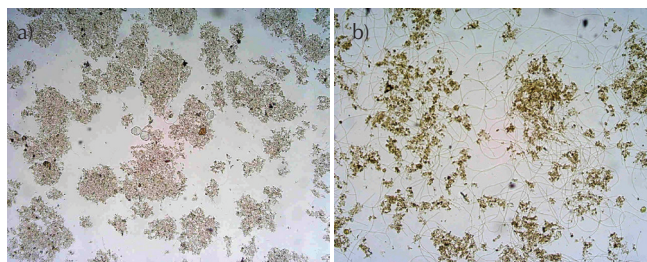
nadzirati njihov rast, odnosno kontrolirati čimbenike koji utječu na njih. Različite vrste mikroorganizama, najčešće bakterije, uz prisutnost kisika svojim metabolizmom i enzimatskim procesima razgrađuju otopljenе sastojke u otpadnoj vodi koje im služe kao izvor hranjivih tvari. Osim bakterija, u mješovitoj mikrobnj zajednici prisutne su i druge vrste organizama, kao što su to alge, protozoe, metazoe, rotifere.

Mikroorganizmi imaju ključnu ulogu u biorazgradnji koja se temelji na uklanjanju organskih tvari, pri čemu mikrobiološka zajednica mora biti dobre kakvoće i održiva. Aktivnost mikroorganizama uvjetovana je mnogim čimbenicima, kao što su to prisutnost hranjivih tvari, temperatura, koncentracija otopljenog kisika, pH vrijednost te koncentracija toksičnih tvari u otpadnoj vodi. Da bi se razgradnja otopljenih sastojaka iz otpadne vode provodila istovremeno i učinkovito, mikroorganizmi trebaju djelovati kao mješovite mikrobne zajednice temeljene na različitim zakonitostima njihova međudjelovanja. Hranjivim tvarima prisutnim u otpadnoj vodi bakterije se koriste za rast, proizvodnju energije i održavanje stanica. Viši oblici mikroorganizama, poput protozoa i rotifera, funkcioniraju kao prirodna kontrola brojnosti bakterijske populacije koja im služi kao izvor hrane. Uklanjanjem bakterija igraju važnu ulogu u kontroliranju koncentracije aktivnog mulja.

### Pahuljice aktivnog mulja

Aktivni mulj nastaje međusobnim povezivanjem mikroorganizama i suspendiranih tvari u veće ili manje nakupine zvane pahuljice (slika 1a). Bakterije čine oko 95 % od ukupne biomase aktivnog mulja i odgovorne su za oksidaciju i transformaciju većine organske tvari. Imaju najveću biokemijsku aktivnost zbog brzog staničnog rasta te raznolikog enzimskog potencijala i proizvode ekstracelularnu polimernu tvar koja omogućuje flokulaciju, odnosno stvaranje pahuljica aktivnoga mulja.

Suha tvar aktivnog mulja sastoji se od kompleksa mineralne i organske tvari. Mineralni dio (10 – 30 %) sastoji se uglavnom od fosfora i kalcija. Najveći udio u organskoj tvari čine proteini (oko 70 %). Njihova količina ovisi o vrsti mikroorganizama, starosti aktivnog mulja i sastava otpadnih voda. Aktivni mulj sadrži i znatne količine lipida te ugljikohidrata. Veličina pahuljica kreće se od nekoliko desetaka do nekoliko tisuća mikrometara, na što u znatnoj mjeri utječe i prisustvo nitastih bakterija. Nitaste bakterije prožimaju pahuljicu i održavaju je cjelovitom. Ako njihov broj ili



**Slika 1** – a) Mikrofotografija pahuljica aktivnog mulja, P = 100×; b) Mikrofotografija pahuljica aktivnog mulja s nitastim bakterijama, P = 100×

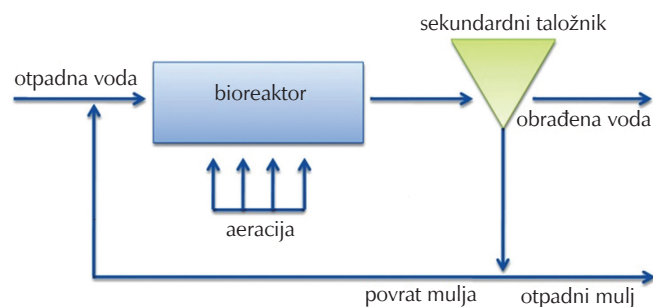
\* Prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac  
e-pošta: mvukovic@kit.hr

udio u pahuljici postane prevelik (slika 1b), smanjuje se sposobnost njihova taloženja.

Pahuljice aktivnog mulja predstavljaju najvažniji element u procesu obrade otpadne vode. Stvaranje pahuljica ovisi o sposobnosti samih stanica da stvaraju pahuljice, o kakvoći otpadne vode te o koncentraciji otopljenog kisika i hidrodinamičkim uvjetima u sustavu.

## Proces obrade otpadne vode aktivnim muljem

Proces s aktivnim muljem najčešći je način pročišćavanja otpadnih voda opterećenih organskim tvarima. Uklanjanje organskih tvari provodi se pomoću aerobnih mikroorganizama koji se nalaze unutar pahuljice ili na pahuljici aktivnog mulja. Aeracijom suspenzije aktivnog mulja i otpadne vode u bioreaktoru (slika 2) osigurava se izmjena supstrata i produkata metabolizma, kao i potrebna količina kisika za održavanje životne aktivnosti mikroorganizama. U sekundarnom taložniku razdvaja se čvrsta faza (aktivni mulj) od pročišćenog izlaznog toka. Jedan dio aktivnog mulja ponovno se vraća u proces gdje služi kao aktivator biološkog procesa, a drugi otpadni mulj se dalje obrađuje posebnim postupcima. U aeracijskom bazenu moraju se osigurati povoljni životni uvjeti, abiotički i biotički, za rast i razvoj aktivnog mulja. Organska tvar može biti transformirana oksidacijom u krajnje oksidacijske produkte poput CO<sub>2</sub>, nitrata, sulfata i fosfata, uz biosintezu u biomasu.



Slika 2 – Proces obrade otpadne vode aktivnim muljem

Učinkovitost obrade otpadne vode aktivnim muljem ovisi o ulaznoj koncentraciji i sastavu otpadne vode kao supstrata, pri čemu važnu ulogu ima vrsta prisutne organske tvari, koncentracija mikroorganizama, vrijeme trajanja kontakta supstrata s mikroorganizmima i koncentracija raspoloživog kisika te pH-vrijednost, temperatura i hidrauličko vrijeme zadržavanja otpadne vode te vrijeme zadržavanja stanica mikroorganizama u bioreaktoru.

## Kinetička analiza procesa

Mikrobna razgradnja definira se općenito kao biološki katalizirano smanjenje kemijske složenosti organskih tvari. U prirodnom okolišu uvjeti za biorazgradnju vrlo su složeni, pa brzina i stupanj biorazgradnje ovise o kemijskim, fizikalnim i biološkim čimbenicima koji mogu biti različiti za različite ekosustave. Iako su mikrobni procesi vrlo kompleksni, pojedina procesna zbivanja, ili skupine tih zbivanja, mogu se predstaviti pomoću modela. Proučavanje dinamike procesa biorazgradnje zahtijeva primjenu matematičkog modeliranja zbog lakšeg razumijevanja procesa koji je rezultat međusobnih djelovanja različitih faktora uključenih u tom složenom sustavu.

Promjene koncentracije biomase u mikrobnoj kulturi tijekom ravnotežnog rasta općenito se opisuju kinetikom prvog reda. Brzina rasta u svakom trenutku proporcionalna je broju ili masi mikroorganizama prisutnih u sustavu u vremenu:

$$r_x = \frac{dX_v}{dt} = \mu \cdot X_v$$

Najpoznatiji kinetički model koji povezuje rast biomase s koncentracijom supstrata postavio je Monod. On je definirao funkcijsku ovisnost specifične brzine rasta biomase i koncentracije:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s + S}$$

Pri nekom vremenskom pomaku promjena koncentracije supstrata proporcionalna je koncentraciji prisutne biomase:

$$r_s = \frac{dS}{dt} = q_s \cdot X_v$$

Brzina stvaranja biomase manja je od brzine potrošnje supstrata jer se reakcijama katabolizma neki dijelovi supstrata prevode u nerastući faktor. Stoga vrijedi jednadžba:

$$r_x = Yr_s$$

Koncentracija supstrata obično se smanjuje rastom mikroorganizama te se može razviti sljedeća jednadžba:

$$r_s = \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} X_v S}{K_s + S}$$

Pri kraju procesa biorazgradnje, kad je većina supstrata uklonjena, dolazi do smanjenja koncentracije biomase s obzirom na to da dio mikrobne populacije odumire. Za izračunavanje tog fenomena pretpostavlja se da je brzina smanjenja koncentracije biomase proporcionalna koncentraciji biomase u sustavu:

$$r_d = \left( \frac{dX_v}{dt} \right)_d = k_d X_v$$

Smanjenje koncentracije stanica poznato je kao faza endogene respiracije.

## Simboli

$k_d$	konstanta odumiranja mikroorganizama, d <sup>-1</sup>
$K_s$	konstanta zasićenja supstratom, mg dm <sup>-3</sup>
$q_s$	specifična brzina potrošnje supstrata, g g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
$r_d$	brzina odumiranja, g dm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>
$r_s$	brzina potrošnje supstrata, g dm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>
$r_x$	brzina rasta biomase, g dm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>
$S$	koncentracija supstrata, mg dm <sup>-3</sup>
$t$	vrijeme, d
$X_v$	koncentracija biomase, g dm <sup>-3</sup>
$Y$	koeficijent iskorištenja, g g <sup>-1</sup>
$\mu$	specifična brzina rasta, d <sup>-1</sup>
$\mu_{\max}$	maksimalna specifična brzina rasta biomase, d <sup>-1</sup>

## Literatura

1. L. K. Wang, N. C. Pereira, Y.-T. Hung, Biological treatment processes, Humana Press, New York, 2009.
2. M. Vuković, Disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2006.
3. G. Bitton, Wastewater Microbiology, John Wiley & Sons, New York, 2005.
4. T. J. Casey, Unit treatment processes in water and wastewater engineering, John Wiley & Sons, New York, 1997.