

MOGUĆNOSTI MODELA AKTIVNOG MULJA (ASM 1) I ZNAČAJ UVOĐENJA MODELIRANJA U UPRAVLJANJE POSTROJENJIMA ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

CAPABILITIES OF THE ACTIVATED SLUDGE MODEL (ASM 1) AND THE SIGNIFICANCE OF INTRODUCING MODELING IN THE MANAGEMENT OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS

IVAN KRSTIĆ¹

Stručni rad

DOI: 10.5937/VIK24467K

Rezime: U ovom radu predstavljene su osnove matematičkog modeliranja projektovanja i rada u sistemima za prečišćavanje otpadnih voda aktivnim muljem ASM. Tokom godina razvijeno je nekoliko modela ASM 1 (Activated sludge model 1), ASM 2, ASM 2d i ASM 3. Istaknuta je potreba da se u domaću praksu upravljanja postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda koje koriste aktivni mulj uvedu ovi modeli.

Ključna reč: aktivni mulj, matematičko modeliranje, ASM 1

Abstract: This paper presents the basics of mathematical modeling of design and operation in activated sludge wastewater treatment systems. Several models ASM 1 (Activated sludge model 1), ASM 2, ASM 2d and ASM 3 have been developed over the years. The need to introduce these models into the domestic practice of managing wastewater treatment plants that use activated sludge was highlighted.

Key Word: activated sludge, mathematical modeling, ASM 1

1. Istorijat

Godine 1982. Međunarodna asocijacija za istraživanje i kontrolu zagađenja vode (IAWPRC, današnja IWA), kako se tada zvala, osnovala je radnu grupu za matematičko modeliranje za projektovanje i rad procesa aktivnog mulja. Stvoreno je nekoliko modela koji nisu doživela neku veću primenu, što zbog ograničenja u brzini računara, što zbog nepoverenja u modele.

¹ Ivan Krstić, Nikole Skobaljica 151/17, Leskovac, krsticiv@gmail.com, ORCID: 0009-0002-7922-8210

Cilj je bio da se napravi platforma sa minimalnom složenošću koja bi se koristila kao osnova za budući razvoj matematičkog modela za uklanjanje azota u procesima aktivnog mulja.

Tako je nastao matematički model ASM 1 koji je predstavljem 1985. godine, a objavljen je 1987. Predstavljen je ne samo model, već i smernice za karakterizaciju otpadnih voda i razvoj kompjuterskih kodova, kao i skup podrazumevanih vrednosti koje su se od tada pokazale kao vrlo korektne jer da daju realne rezultate pri primeni modela uz samo manje izmene parametara.

ASM 1 je bio dobro prihvaćen i naširoko je korišćen kao osnova za dalji razvoj modela. Direktna upotreba ASM 1 za modeliranje bila je skoro nikakva, ali ASM 1 je bio osnova razvoja modeliranja i uz određene modifikacije naširoko primenjivan.

2. Format, notacija i koncept modela aktivnog mulja ASM 1

Prvi konkretni problem je teško praćenje svih interakcija komponenti sistema. Radna grupa je zaključila da matrični format, zasnovan na radu Petersona (1965), za prezentaciju modela nudi najbolju priliku za prevazilaženje ovog problema uz prenošenje maksimalne količine informacija. Štaviše, smatrali su da treba koristiti notaciju koju je preporučila prethodna radna grupa (Grau et al, 1982). U tabeli 1 predstavljen je format matrice i notacije.

Kao primer razmotrimo situaciju u kojoj heterotrofne bakterije rastu u aerobnom okruženju koristeći rastvorljivi supstrat kao izvor ugljenika i energiju. Pojednostavljajući, dešavaju se dva fundamentalna procesa: biomasa se povećava rastom ćelije i smanjuje se raspadanjem. Drugi događaji, kao što su korišćenje kiseonika i uklanjanje supstrata, takođe se dešavaju, ali se oni ne smatraju fundamentalnim jer su rezultat rasta i raspada biomase i povezani su sa njima kroz stehiometriju sistema. Najjednostavniji model ove situacije mora uzeti u obzir koncentracije tri komponente: biomase, supstrata i rastvorenog kiseonika. Matrica koja uključuje sudbinu ove tri komponente u dva osnovna procesa prikazana je u tabeli 1.

Prvi korak u postavljanju matrice je identifikovanje relevantnih komponenti u modelu. U ovom slučaju to su biomasa, supstrat i rastvoreni kiseonik, koji su navedeni na vrhu tabele 1 *i* simbolom, a na dnu po nazivu i jedinicama. U skladu sa IAWPRC nomenklaturom (Grau et al, 1982), nerastvorljivim sastojcima je dat simbol X, a rastvorljivim komponentama S. Podskripti se koriste za specifikaciju pojedinačnih komponenti: B za biomasu, S za supstrat i O za kiseonik. Indeks *i* je dodeljen svakoj komponenti. U ovom slučaju, *i* se kreće od 1 do 3 za tri jedinjenja u ovom jednostavnom modelu.

Drugi korak u razvoju matrice je identifikacija bioloških procesa koji se dešavaju u sistemu; tj. konverzije ili transformacije koje utiču na navedene

komponente. U ovom primeru su uključena samo dva procesa: aerobni rast biomase i njen gubitak raspadanjem. Ovi procesi su navedeni u krajnjoj levoj koloni matrice. Indeks se dodeljuje svakom procesu; u ovom slučaju, $j = 1$ ili 2.

Kinetički izrazi ili jednačine brzine za svaki proces se beleže u krajnjoj desnoj koloni matrice u odgovarajućem redu. Brzine procesa su označene sa ρ_j , gde j odgovara procesu koji je numerisan u krajnjoj levoj koloni. Ako bismo koristili jednostavan Monod-Herbert (Herbert, 1958) model za ovu situaciju, izrazi brzine bi bili oni u tabeli 1. Monod jednačina, ρ_1 kaže da je rast biomase proporcionalan biomasi, koncentraciji na način prvog reda i koncentraciji supstrata na način mešovitog reda. Herbertov izraz, ρ_2 , navodi da je raspadanje biomase prvog reda u odnosu na koncentraciju biomase. Kinetički parametri koji se koriste u izrazima stopa definisani su u donjem desnom uglu tabele.

Elementi unutar matrice obuhvataju stehiometrijske koeficijente, v_{ij} , koji određuju masene odnose između komponenti u pojedinačnim procesima. Na primer, rast biomase (+1) se dešava na račun rastvorljivog supstrata (-1/Y); kiseonik se koristi u metaboličkom procesu $[-(1-Y)/Y]$. Koeficijenti, v_{ij} , su u velikoj meri pojednostavljeni radom u doslednim jedinicama. U ovom slučaju, svi organski sastojci su izraženi kao ekvivalentne količine hemijske potrebe za kiseonikom (HPK); isto tako, kiseonik se izražava kao negativna potreba za kiseonikom.

Tabela 1. Kinetika i stehiometrija procesa za rast heterotrofnih bakterija u aerobnom okruženju

Table 1. Process kinetics and stoichiometry for heterotrophic bacterial growth in an aerobic environment

tok procesa →							
bilans mase ↓	komponente →		i	1	2	3	brzina procesa, ρ_j [$\text{ML}^{-3} \text{T}^{-1}$]
	j proces ↓			X_B	S_s	S_o	
	1 rast			1	-1/Y	$-\frac{1-Y}{Y}$	$\frac{\tilde{\mu} S_s}{K_s + S_s} X_B$
	2 izumiranje			-1		-1	$b X_B$
	uočena brzina konverzije			$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j v_{ij} \rho_j$			
	Stehiometrijski parametri: Pravi prinos rasta: Y			BIMASA [M(HPK)L ⁻³]	SUPSTRAT [M(HPK)L ⁻³]	KISEONIK [M(-HPK)L ⁻³]	Kinetički parametri: Maksimalna specifična brzina rasta $\tilde{\mu}$ Konstanta poluraspada K_s Specifična brzina odumiranja b

Konvencija predznaka koja se koristi u matrici je negativna za potrošnju i pozitivna za proizvodnju. Svi stehiometrijski koeficijenti su definisani u donjem levom uglu tabele. Stvar koja je bila uzrok zabune i u izvesnoj meri kočila razvoj teorije o aktivnom mulju je nedostatak dosledne mere koncentracije organskog materijala u otpadnim vodama. Tri mere su postale prihvaćene i široko se koriste: biohemijska potreba za kiseonikom (BPK), ukupni organski ugljenik (TOC) i hemijska potražnja za kiseonikom (HPK). Od njih verujemo da je HPK nesumnjivo superiorna mera jer samo ona obezbeđuje vezu između elektronskih ekvivalenata u organskom supstratu, biomase i iskorišćenog kiseonika (Gaudi i Gaudi, 1971). Štaviše, bilansi mase se mogu napraviti u smislu HPK-a. Shodno tome, koncentracije svih organskih materijala, uključujući biomasu, su u ovom modelu aktivnog mulja je u HPK jedinicama.

3. Opis ASM 1

U tabeli 2 prikazane su komponente i procesi u sistemima aktivnog mulja koje je neophodno poznavati da bi se uspešno odredila kinetika i stehiometrija procesa oksidacije ugljenika, nitrifikacije i dentrifikacije.

3.1. Komponente obuhvaćene u ASM 1

Komponente u modelu su prikazane na vrhu i dnu tabele 2. Rastvorljive inertne i čestice inertne organske materije, S_I i X_I , nisu uključene ni u jedan proces konverzije i stoga njihove kolone ($i = 1$ i 3 , respektivno) nemaju stehiometrijske koeficijenate. Ipak, oni su uključeni jer su važni za performanse procesa. Rastvorljiva inertna organska materija doprinosi enfluentnom HPK-a. Čvrsta inertna organska materija postaje deo isparljivih suspendovanih čvrstih materija u sistemu aktivnog mulja. Kao što je ranije diskutovano, svi organski sastojci, uključujući i čestice, izraženi su u HPK jedinicama i to je prikazano u tabeli 2.

Krećući se niz kolonu $i = 2$, može se videti da se lako biorazgradivi supstrat, S_s , uklanja rastom heterotrofnih bakterija u aerobnim ili anoksičnim uslovima i formira se hidrolizom čestica organske materije zarobljene u biofloklu.

Kolona $i = 4$ otkriva da se sporo biorazgradivi supstrat X_s uklanja hidrolizom, ali nastaje raspadom i heterotrofne i autotrofne biomase. Drugim rečima, raspadanje dovodi do transformacije ćelijskog materijala u sporo biorazgradiv supstrat.

Kolone gde $i = 5$ i 6 predstavljaju biomasu u sistemu, pri čemu X_{BH} označava heterotrofnu biomasu, a X_{BA} autotrofnu biomasu. Kretanje niz kolonu $i = 5$ otkriva da se heterotrofna biomasa može formirati rastom u aerobnim ili anoksičnim uslovima. Nestaje raspadanjem. Kao što se vidi u koloni $i = 6$, rast autotrofa se javlja samo u aerobnim uslovima. I oni su nestali raspadanjem.

Kolona $i = 7$ sadrži čestice koje nastaju kao produkt raspadanja biomase, X_P (Kountz i Fornei, 1959; McKinney i Ooten, 1969). Što se kinetike procesa i stehiome-

trije tiče, one nastaju raspadom i heterotrofne i autotrofne biomase, ali se ne uništava.

Kolona $i = 8$ sadrži koncentraciju DO , S_O , u reaktoru. za kiseonikom. Drugi akceptor elektrona uključen u model je nitratni azot, S_{NO} , koji se proizvodi aerobnim rastom autotrofnih bakterija i uklanja tokom anoksičnog rasta heterotrofne biomase, što se može videti pomeranjem niz $i = 9$ kolone.

Kolona $i = 10$ sadrži rastvorljivi amonijačni azot, S_{NH_3} , za koji se pretpostavlja da je zbir jonizovanog (amonijum) i nejonizovanog (amonijak) oblika.

Kolona $i = 11$ sadrži rastvorljivi organski azot, S_{ND} , koji nastaje hidrolizom čestičnog organskog azota i amonifikacijom se pretvara u amonijačni azot. Čvrsti biorazgradivi organski azot, X_{ND} , dat je u koloni $i = 12$. Generiše se raspadom i heterotrofne i autotrofne biomase, i_{XB} , minus količina povezana sa inernim česticama, $f_P i_{XP}$, i gubi se amonifikacijom.

Kolona $i = 13$ predstavlja ukupnu alkalnost, S_{ALK} . Uključivanje alkaliteta u model nije od suštinskog značaja, ali je njegovo uključivanje poželjno jer pruža informacije pomoću kojih se mogu predvideti neopravdane promene pH. Sve reakcije koje uključuju dodavanje ili uklanjanje vrsta sa kapacitetom prihvatanja protona i/ili dodavanje ili uklanjanje protona će izazvati promene u alkalnosti.

3.2. *Procesi obuhvaćeni u ASM 1*

Osnovni procesi ugrađeni u model navedeni su u krajnjoj levoj koloni tabele 2, dok su njihovi izrazi brzine navedeni u krajnjoj desnoj koloni. U osnovi, razmatraju se četiri procesa: rast biomase, raspadanje biomase, amonifikacija organskog azota i 'hidroliza' organskih čestica koje su zarobljene u bioflokulaciji.

Proces 1. je aerobni rast heterotrofne biomase. Ispitivanje reda 1 u tabeli 2 pokazuje da se rast odvija na račun rastvorljivog supstrata i rezultira proizvodnjom heterotrofne biomase. S tim u vezi je i korišćenje kiseonika.

Proces 2 predstavlja anoksični rast heterotrofne biomase sa nitratnim azotom kao terminalnim akceptorom elektrona. Kao i aerobni rast, on se dešava na račun lako biorazgradivog supstrata i rezultira heterotrofnom biomasom. Nitratni azot služi kao terminalni akceptor elektrona i njegovo uklanjanje je proporcionalno količini uklonjenog lako biorazgradivog supstrata minus količina formiranih ćelija.

Aerobni rast autotrofne biomase prikazan je u procesu 3 tabele 2. Rastvorljivi amonijačni azot služi kao izvor energije za rast nitrifikatora koji rezultira autotrofnom ćelijskom masom i nitratnim azotom kao krajnjim proizvodima. Pristup usvojen za modeliranje propadanja heterotrofne biomase je u osnovi koncept smrti-regeneracije, a prikazan je u procesu 4. tabele 2. Tu se može videti da je usvojeni izraz brzine prilično jednostavan, odnosno prvog reda u odnosu na koncentraciju heterotrofne biomase. Međutim, koeficijent brzine se razlikuje i po konceptu i po veličini od uobičajenog koeficijenta opadanja. Propadanje autotrofa, dato u procesu

5, i tretira se na potpuno isti način kao i propadanje heterotrofa. Rastvorljivi organski azot se pretvara u amonijačni azot kroz reakciju prikazanu u procesu 6 tabele 2. Ova jednostavna jednačina prvog reda je empirijske prirode, ali se pokazalo da je adekvatna za modeliranje konverzije kada je spojena sa jednačinom brzine procesa za hidrolizu. zarobljenog organskog azota (Dold i Marais, 1986).

U redovima 7 i 8 u tabeli 2 prikazani su modeli koji su usvojeni za hidrolizu sporo biorazgradivih organskih materija i biorazgradivog organskog azota. Degradacija sporo biorazgradivih organskih materija je veoma važna za realistično modeliranje sistema aktivnog mulja, jer je prvenstveno odgovorna za postizanje realističnih prostorno-vremenskih i realno vremenski zavisnih profila akceptora elektrona.

Tabela 2. Kinetika i stehiometrija procesa oksidacije ugljenika, nitrifikacije i denitrifikacije u sistemu aktivnog mulja

Table 2. Kinetics and stoichiometry of carbon oxidation, nitrification denitrification processes in the activated sludge system

Komponente $\rightarrow$		i	1	2	3	4	5	6	7	8
j	Proces $\downarrow$		S_I	S_S	X_I	X_S	$X_{B,H}$	$X_{A,H}$	X_P	S_O
1	Aerobni rast heterotrofa			$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$
2	Anoksični rast heterotrofa		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1 - Y_H}{2,86 Y_H}$
3	Aerobni rast autotrofa							1		$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A}$
4	Propadanje „smrt“ heterotrofa					$1 - f_P$	-1		f_P	
5	Propadanje „smrt“ autotrofa					$1 - f_P$		-1	f_P	
6	Amonifikacija rastvorljivog organskog azota									
7	Hidroliza „zarobljenih“ organizama			1		-1				
8	Hidroliza „zarobljenog“ organskog azota									
Posmatrana brzina konverzije ($ML^{-3}T^{-1}$)			$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$							

Komponente $\triangleright$		i	1	2	3	4	5	6	7	8
j	Proces $\downarrow$		S_I	S_S	X_I	X_S	$X_{B,H}$	$X_{A,H}$	X_P	S_O
Stehiometrijski parametri: Heterotrofni rast Y_H Autotrofni rast Y_A Frakcija biomase prirast čestičnih produkata f_P Masa N/Masa HPK u biomasi $i_{X,B}$ Masa N / Masa HPK u produktim biomase $i_{X,P}$			Ras. inertna organska sup. $[M(HPK)L^{-3}]$	Lako biorazgradivie organske supstance $[M(HPK)L^{-3}]$	Čestična inertna org. sup. $[M(HPK)L^{-3}]$	Sporo biorazgradiv supstrat $[M(HPK)L^{-3}]$	Aktivna heterotrofna biomasa $[M(HPK)L^{-3}]$	Aktivna autotrofna biomasa $[M(HPK)L^{-3}]$	Čestični produkti nastali propadanjem biomase $[M(HPK)L^{-3}]$ $[M(COD)L^{-3}]$	Kisemonik (negativni HPK) $[M(-HPK)L^{-3}]$

Tabela 3. Kinetika i stehiometrija procesa oksidacije ugljenika, nitrifikacije i denitrifikacije u sistemu aktivnog mulja (nastavak)

Table 3. Kinetics and stoichiometry of carbon oxidation, nitrification and denitrification processes in the activated sludge system (continuation)

Komponente $\blacktriangleright$		i	9	10	11	12	13	Brzina procesa ρ_i (ML ⁻³ T ⁻¹)
j	Proces $\downarrow$		S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1	Aerobni rast heterotrofa			$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\eta_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
2	Anoksični rast heterotrofa	$-\frac{1}{2,86}$		$-i_{XB}$			$\frac{1 - Y_H}{14 - 2,86 Y_H}$ $-\frac{i_{XB}}{14}$	$\eta_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right)$ $\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{B,H} \eta_g$
3	Aerobni rast autotrofa	$\frac{1}{Y_A}$		$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$ $-\frac{1}{7Y_A}$	$\eta_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
4	Propadanje „smrt“ heterotrofa					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		$b_H X_{B,H}$
5	Propadanje „smrt“ autotrofa					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		$b_A X_{B,A}$
6	Amonifikacija rastvorljivog organskog azota				-1		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{N,D} X_{B,H}$

Komponente		i	9	10	11	12	13	Brzina procesa ρ_i (ML ⁻³ T ⁻¹)
j	Proces		S _{NO}	S _{NH}	S _{ND}	X _{ND}	S _{ALK}	
7	Hidroliza „zarobljenih“ organizama							$k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X + (X_S/X_{B,H})} \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{N,O}}{K_{N,O} + S_{N,O}} \right)$
8	Hidroliza „zarobljenog“ organskog azota				1	-1		$\rho_7 \left(\frac{X_{N,D}}{X_S} \right)$
Posmatrana brzina konverzacije (ML ⁻³ T ⁻¹)								
Stehiometrijski parametri: Heterotrofni rast Y _H Autotrofni rast Y _A Frakcija biomase prirast čestičnih produkata f _p Masa N/Masa HPK u biomasi i _{X,B} Masa N / Masa HPK u produktim biomase i _{X,P}			Nitratri i nitrini azot $\left[\frac{M(N)}{L^{-3}} \right]$	NH ₄ ⁺ + NH ₃ azot $\left[\frac{M(N)}{L^{-3}} \right]$	Rastvoreni biorazgradivi organski azot $\left[\frac{M(N)}{L^{-3}} \right]$	Čestični biorazgradivi organski azot $\left[\frac{M(N)}{L^{-3}} \right]$	Alkalitet (molame jedinice)	Kinetički parametri: - heterotrofni rast i propadanje $\hat{\mu}_H, K_S, K_{O,H}, K_{N,O}, b_H$ - autotrofni rast i propadanje $\hat{\mu}_A, K_{NH_3}, K_{O,A}, b_A$ - korekcionni faktor za anoksični rast heterotrofa η _g - amonifikacija k _a - hidroliza k _h , K _X - korekcionni faktor za anoksičnu hidrolizu η _h

4. Zaključak

Autor ovog rada svestan je da svaki tehnolog ili inženjer neke druge struke koji rade na postrojenjima za preradu otpadnih voda može relativno lako doći do ovih informacija. Međutim, kako sam obišao većinu postrojenja za preradu otpadnih voda nisam primetio da se matematičko modeliranje primenjuje niti se njemu razmišlja o njemu na ozbiljnijem nivou (kupovina programa, obuka kadra). Ovaj rad ima za cilj da inicira rad na matematičkom modeliranju procesa aktivnog mulja, pogotovo modele ASM 2d i ASM 3, čije je korišćenje u svetu u sličnim fabrikama postalo u neku ruku obavezno. Kako je ovo multidiscipliniran projekat neohodno je da inženjeri iz svih fabrika za preradu otpadnih voda zajedničkim radom (sa svim svojim kapacitetima i iskustvom) polako uvode matematičko modeliranje u svoje sisteme.

5. Literatura

- [1] Henze Mogens, Willi Gujer, Takashi Mino Mark van Loosdrecht, *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater, IAWPRG, 1987.
- [2] Carlsson B, *The Activated Sludge Model No 1 ASM1*, Uppsala universitet, 2016.
- [3] Mulas M, *Modelling and Control of Activated Sludge Processes*, Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale Università degli Studi di Cagliari, 2006.