

www.skripta.info

UNIVERZITET U BEOGRADU

Dragan Povrenović

Milena Knežević

OSNOVE TEHNOLOGIJE PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA

TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET
Beograd, 2013.

PREDGOVOR

Inženjerstvo zaštite životne sredine se na Tehnološko-metalurškom fakultetu izučava još od 1972. godine, u okviru koga je posebno mesto imala tehnologija vode i prečišćavanja otpadnih voda. Značaj same tematike, koja je, posebno u razvijenim zemljama, u prethodnim godinama podignuta na vrlo visok nivo, opredelio je autore da se odvaže i pripreme novi material u ovoj oblasti. Problematika tehnologije prečišćavanja otpadnih voda na našim prostorima nije u dovoljnoj meri obrađivana kroz udžbenička izdanja, još od kako je to učinila grupa autora na našem fakultetu, sada već daleke 1980. godine. U međuvremenu, razvoj novih materijala i tehnika, doprineo je da se i u ovoj oblasti naprave značajna tehnološka unapređenja u pogledu efikasnosti i kapaciteta sistema, koje je potrebno poznavati. Veoma mali udeo prečišćenih otpadnih voda u Srbiji, u ovom trenutku, nedvosmisleno pokazuje da ima velike potrebe za materijalom koji je obrađen u ovoj knjizi.

Ovaj udžbenik je prevashodno namenjen studentima koji slušaju kurs o prečišćavanju otpadnih voda na osnovnim i kurs Inženjerstvo zaštite životne sredine na master studijama na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Istovremeno, mogu ga koristiti i studenti doktorskih studija koji prethodno nisu slušali ove kurseve, kao i studenti sa drugih fakulteta koji izučavaju problematiku zaštite životne sredine i prečišćavanja otpadnih voda. Posebno, ovaj materijal je namenjen i zaposlenim u komunalnim preduzećima, koji se bave prečišćavanjem komunalnih otpadnih voda ili tek planiraju da pristupe rešavanju problema prečišćavanja otpadnih voda, kako bi se upoznali sa osnovnim operacijama i procesima koji se koriste. Veliki broj rešenih primera, koji su prezentovani u ovoj knjizi, može da posluži i projektantima koji se bave izradom projekata i izvođenjem postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, kao vodič o načinu i redosledu koraka pri proračunu pojedinih parametara sistema.

Opisane tehnologije se koriste do nivoa tzv. sekundarne obrade, koja se najšire i primenjuje za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda. Pojedini fizičko-hemijski postupci koji su opisani, a koji se sreću i u tercijernoj obradi, ovde su dati, pre svega, sa gledišta njihove moguće primene kod predtretmana industrijskih otpadnih voda, pre ispuštanja u gradski kanalizacioni sistem.

U prezentovanom materijalu obrađena je linija vode, a tretman otpadnog mulja je samo naznačen, pošto je to posebna celina uvažavajući mnoštvo mogućih primenljivih tehnoloških postupaka.

Sadržaj je podeljen u šest osnovnih celina. Obrađene su opšte karakteristike otpadnih voda, mehanički i fizičko-hemijski postupci, u okviru primarne obrade, biološki postupci u okviru sekundarne obrade, dezinfekcija kao posebno poglavlje a u šestom poglavlju su dati rešeni zadaci koji obuhvataju sve tehnološke postupke obrađene u prvih pet poglavlja.

Dugogodišnja saradnja sa Institutom za vodoprivredu Jaroslav Černi i Udruženjem za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo je doprinela da knjiga ima ovakvu formu i bude dostupna širokom krugu čitaoca.

Autori se posebno zahvaljuju recenzentima i urednicima na korisnim sugestijama koje su doprinele da knjiga ima ovakav sadržaj, kao i svima koji su učestvovali u grafičkoj pripremi ovog izdanja.

U Beogradu, aprila 2013.

Autori:
Dragan Povrenović
Milena Knežević

SADRŽAJ

LISTA SIMBOLA	i
1. OPŠTE KARAKTERISTIKE OTPADNIH VODA	1
1.1. Tipovi otpadnih voda.....	4
1.2. Količine otapadnih voda.....	6
1.3. Karakteristike otpadnih voda	8
1.3.1. Fizičko-hemijske karakteristike otpadnih voda.....	9
1.3.2. Određivanje sadržaja organskih zagađujućih materija u vodi	19
1.3.3. Biološke karakteristike otpadnih voda.....	26
1.4. Procesi, operacije, linije i sistemi za prečišćavanje otpadnih voda	28
1.4.1. Vrste linija za prečišćavanje otpadnih voda	29
1.4.2. Sistem za prečišćavanje otpadnih voda	30
1.4.3. Konvencionalni sistem za prečišćavanje otpadnih voda	34
1.4.4. Konvencionalni sistem za stabilizaciju mulja	39
1.4.5. Napredne tehnike	39
2. MEHANIČKI TRETMAN	43
2.1. Merenje protoka	44
2.2. Egalizacija	49
2.3. Rešetke	51
2.4. Taloženje	53
2.4.1. Agregatno taloženje	64
2.5. Flotacija	71
3. FIZIČKO-HEMIJSKI TRETMAN	77
3.1. Koagulacija i flokulacija	77
3.2. Hemijska precipitacija	90
3.3. Podešavanje pH-vrednosti	94
3.4. Oksidacija	99
3.5. Adsorpcija	105
3.6. Aeracija	108
4. BIOLOŠKI TRETMAN OTPADNIH VODA	121
4.1. Kinetički parametri i materijalni bilansi bioprocesa	127
4.2. Aktivni mulj	142
4.2.2. Suspendovane materije	144
4.2.2. Količina potrebnog kiseonika za biološko prečišćavanje otpadnih voda	148
4.2.3. Sistem aktivnog mulja bez recirkulacije	151
4.2.4. Sistem aktivnog mulja sa recirkulacijom	155
4.2.5. Sistem aktivnog mulja sa idealnim proticanjem	159
4.2.6. Sistem sa sukcesivnom oksidacijom ugljenika i azota (nitrifikacija)	161
4.2.7. Biološka denitrifikacija	166
4.2.8. Biološko uklanjanje fosfora	169
4.3. Sekundarno taloženje	170
4.4. Biofiltracija	181
4.4.1. Kapajućí biofiltri	181
4.4.2. Biodisk proces	191
4.5. Anaerobni tretman otpadnih voda	193
4.5.1. Brzina odvijanja anaerobnog procesa	195

4.5.2.	Proizvodnja metana	197
4.5.3.	Parametri anaerobnog procesa	198
4.5.4.	Tipovi reaktora za izvođenje anaerobnog procesa	199
5.	DEZINFEKCIJA	203
6.	ZADACI SA REŠENJIMA	209
	Merenje protoka.....	209
	Egalizacija	225
	Rešetke	235
	Taloženje	237
	Agregatno taloženje	252
	Flotacija	256
	Koagulacija i flokulacija	265
	Hemijska precipitacija	283
	Podšavanje <i>pH</i> vrednosti	295
	Oksidacija	300
	Adsorpcija	303
	Aeracija	316
	Kinetički parametri i bilansi bioprocesa	339
	Aktivni mulj	370
	Sekundarno taloženje	429
	Biofiltracija i biodisk	444
	Anaerobna obrada	471
	Dezinfekcija	479
	LITERATURA	491
	INDEKS POJMOVA	497

LISTA SIMBOLA

A	konstanta karakteristična za mikroorganizam, $vreme^{-1}$
A	maseni protok vazduha upotrebljenog za flotaciju, kg/h
A	površina dna taložnika, m^2
A	površina letvi na točku, m^2
A	površina poprečnog preseka ispunjenog vodom, m^2
A	površina potrebna za zonalno taloženje, m^2
A	površina taložnika, m^2
$\frac{A_s}{Q}$	odnos površine grupe biodiskova prema zapreminskom protoku vode,
$\frac{d}{m}$	
AR_{20}	potrebna zapremina vazduha, m^3/h
A_{bf}	površina poprečnog preseka filtra, m^2
A_p	projektovana površina čestice u pravcu taloženja čestica, m^2
a_i	aktivnost i-tog jona, mol/L
a	vrednost rastvorljivosti vazduha u vodi na radnim uslovima i pritisku od $1 atm$, $\frac{mg}{mL}$
a, b	Lengmirove konstante,
B	faktor oblika šipki, (dat u Tabeli 2.3)
b	minimalni prazan prostor između šipki, m
BOD	koncentracija organskog zagađenja u otpadnoj vodi, g/m^3
C	koeficijent isticanja vode kroz rešetke, bezdimenziona veličina sa tipičnom vrednošću 0,84
C	koncentracija adsorbata u rastvoru, mg/L
C	koncentracija dezinficijensa, mg/L
C	koncentracija rastvorenog kiseonika u vodi, kg/m^3
C	konstanta, 0,443
C, n	konstante,
$C_{s,T,H}$	srednja vrednost koncentracije zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi u aeracionom bazenu na temperaturi T i nadmorskoj visini H , mg/L
C_D	koeficijent trenja, bezdimenziona veličina
C_L	koncentracija kiseonika za radne uslove, uobičajena vrednost $2 mg/L$
C_L	radna (željena) koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, mg/L
C_w	koncentracija zasićenja kiseonika u otpadnoj vodi pri radnim uslovima, mg/L
C_i	koncentracija i-tog jona, mol/L

C_m	koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, na sredini visine, u radnim uslovima, mg/L
$C_{s,20}$	koncentracija zasićenja kiseonika na 20°C
$C_{s,T,H}$	koncentracija zasićenja kiseonika u čistoj vodi na temperaturi T i visini H , mg/L
C_{s20}	koncentracija kiseonika pri zasićenju za 20 °C, mg/L
D	spoljni prečnik putanje letve, m
D_i	prečnik lopatica mešalice, m
D_i	prečnik mešalice, m
d	prečnik čestice, m
E_a	energija aktivacije karakteristična za mikroorganizam, kJ/mol
E_s	efikasnost biofiltra, %
e	koeficijent efikasnosti korišćenja supstrata (0,80–0,95)
e	efikasnost uređaja,
F	Faradejeva konstanta, $96,485 C/g eq$
F	recirkulacioni faktor, ili broj prolazaka određene količine vode kroz filter,
F	za pritiske P veće od 2 atm , 0,5 – 1,0
F	faktor zaprljanosti kod difuzera, 0,65 – 0,90
F_D	vučna sila na letvama, N
F_b	sila potiska, N
F_d	sila trenja između čestice i vode, N
F_g	sila gravitacije, N
f	Darsi-Vajzbahov (<i>Darcy-Weisbach</i>) faktor trenja, 0,02 – 0,03
f	za pritiske P veće od 1 atm , 0,167 – 1,0
f_d	frakcija čelijskih ostataka, mg/mg
G	gradijent brzine, s^{-1}
G_b	fluks taložnog sloja čestica, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$
G_s	fluks čestica izazvan gravitacijom, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$
G_t	ukupan fluks svih čestica u taložniku, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$
g	ubrzanje zemljine teže, $9,81 m/s^2$
H	dubina zone taloženja, m
H	visina ispuhe filtra, m
H	nadmorska visina postrojenja, m
$H = H_s$	ukupna dubina vode u kojoj se vrši taloženje i uzimanje uzoraka, m
H_0	početna visina međufazne površine, m
H_∞	debljina sloja mulja nakon dovoljno dugog vremena taloženja, m
H_D	dubina vode do difuzera, m
$H_{L,dbf}$	visina tečnosti na vrhu biofiltra koja bi bila dozirana pri jednom okretu dozatora,
H_{bf}	visina ispuhe biofiltra, m
H_e	Henrijeva konstanta koja se menja u funkciji od temperature T , $atm \cdot m^3/kg$
H_t	debljina sloja mulja u bilo kom trenutku vremena, m

N_p	faktor snage,
N_e	koncentracija azota u efluentu, mg/L
N_p	zbir svih otpora proticanju vazduha kroz ispunu biofiltra,
N_t	broj prisutnih mikroorganizama nakon vremena t ,
n	koeficijent razblaženja,
n	broj krivina koje voda prolazi u bazenu,
n	broj obrtaja, $1/min$
n	broj razmenjenih elektrona,
n	brzina okretanja letve, $obrta\dot{c}i/min$
n	empirijska konstanta zavisna od vrste ispunne filtra, ($= 0,5$)
n	Frojdnlilov eksponent,
n	Manningov koeficijent hrapavosti, $s/m^{1/3}$
n_k	broj krakova dozera,
O_e	sadržaj kiseonika u izlaznoj struji vazduha koja napušta vodu nakon aeracije, izražena u procentima, %
P	potrebna snaga na vratilu mešalice, kW
P	pritisak pod kojim se vazduh uvodi u vodu, Pa, atm
P	pritisak, atm
P	snaga, W
P_D	izlazni pritisak iz difuzera, kPa $P_{HD/2}$ vrednost hidrostatičkog pritiska na polovini dubine bazena između difuzera i površine bazena, izražena u odgovarajućim jedinicama. kPa, atm, m
P_H	pritisak na koti postrojenja, kPa
P_T	snaga po točku, kW
$P_{X,TSS}$	produkcija ukupnog mulja u toku dana, kg/d
$P_{X,VSS}$	ukupna količina proizvedog organskog dela mulja u toku dana, $gVSS/d$
$P_{X,bio}$	produkcija biomase, kg/d
$P_{atm,H=0}$	pritisak na nultoj nadmorskoj visini, $1,01325 \cdot 10^5 N/m^2$
$P_{atm,H}$	ulazni pritisak, kPa
P_{kW}	snaga uređaja za transport vazduha, kW
ΔP	pad pritiska kroz biofilter, kPa
p_g	parcijalni pritisak gasa, Pa
Q	protok otpadne vode u flotacionom bazenu, L/s
Q	protok otpadne vode, m^3/h
Q	zapreminski protok otpadne vode, m^3/s
Q	protok otpadne vode u toku dana, m^3/d
Q	zapreminski protok vazduha, m^3/s
$Q = Q_0$	zapreminski protok supstrata, m^3/h
Q_0	ukupan protok otpadne vode, m^3/s
Q_0	protok influenta u taložnik, $\frac{m^3}{h}$
Q_p	deo protoka otpadne vode u koji se uvodi vazduh pod pritiskom, L/s
Q_r	deo protoka otpadne vode koji se recirkuliše, L/s
Q_w	protok kojim mulj otiče iz taložnika, $\frac{m^3}{h}$

Q_w	protok izlazne struje mulja iz taložnika, $\frac{m^3}{h}$
q	ulazni volumetrijski protok, $\frac{L}{m^2 \cdot s}$
q	hidrauličko opterećenje filtra, $m^3/m^2 \cdot h$
R	hidraulički prečnik, m
R	univerzalna gasna konstanta, $8,3144 J/mol \cdot K$
R	recirkulacioni odnos,
R_0	količina potrebnog kiseonika, $kg O_2/kg BOD$
R_0	količina potrebnog kiseonika, $kg O_2/d$
$R_{1...5}$	udeo čestica koji će biti istaložen u taložniku tokom vremena,
Re_i	Rejnoldsov broj mešanja,
r	rastojanje mereno od centra taložnika, m
r_c	poluprečnik ivice kružnog taložnika, m
r_g	brzina rasta mikroorganizama (biomase), $kg/m^3 \cdot h$
r_i	poluprečnik ulazne centralne cevi (zone) u taložnik, m
S	izlazna koncentracija zagađujućih materija iz bioreaktora, mg/L
S	maseni protok suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, kg/h
S	nagib kanala,
S_0	koncentracija organskog zagađenja u influentu, $kg BOD/m^3$
S_0	ulazna koncentracija zagađujućih materija, mg/L
S_n	koncentracija supstrata na n-toj grupi biodiskova, $\frac{g}{m^3}$
T	temperatura, $^{\circ}C$
T	apsolutna temperatura, K
TDS	ukupna koncentracija rastvorenih soli u vodi, mg/L
TKN	ukupni Kjeldalov azot, mg/L
T_0	ulazna temperature, $^{\circ}C$
T_A	temperatura ambijenta u kome se nalazi biofilter, $^{\circ}C$
t	vreme potrebno da se smanji broj mikroorganizama, h
t	vreme taloženja, min, h
t	vreme zadržavanja vode u bazenu, $t = V/Q$
t	vreme, s
t	vreme dezinfekcije, min
t_w	vreme postizanja željene koncentracije čvrste faze, s
u	brzina fluida, m/s
u_h	horizontalna brzina vode, $\frac{m}{s}$
u_{distr}	brzinu distributora otpadne vode po površini biofiltra, $obrt/min$
V	brzina proticanja vode izmedju rešetki, m/s
V	srednja brzina, m/s
V	zapremina kamene ispune u biofiltru, m^3
V	zapremina reaktora, m^3
V_0	kritična brzina taloženja, m/s
V_b	brzina kojom se kreće taložni sloj čestica, $\frac{m}{h}$
V_b	brzina kretanja istaloženog sloja na dnu taložnika usled oticanja, $\frac{m}{h}$
V_{gas}	količina produkovanog gasa, m^3

V_p	zapremina čestica, m^3
V_s	brzina taloženja pojedinačne čestice, m/s
V_t	brzina taloženja pri stešnjenom taloženju, $\frac{m}{h}$
v	brzina vode u kanalu, m/s
v	brzina vode u dovodnom kanalu, pre prolaska kroz rešetku, m/s
ν	kinematski viskozitet vode, m^2/s
v	površinska brzina proticanja vazduha u filterskom tornju, m/s
v_p	periferna brzina letve, m/s
v_r	relativna brzina letvi u odnosu na vodu, obično iznosi $\frac{3}{4}$ periferne brzine lopatica, m/s
W	napajanje biofiltra organskim zagađenjem u toku dana, $kg\ BOD/d$
W	širina letve, m
W	širina taložnika, m
w	maksimalna širina šipke upravno na pravac proticanja, m
X	koncentracija biomase u aeracionom bazenu (bioreaktoru), mg/L
X	koncentracija suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, mg/L
X	masena koncentracija ćelija, kg/m^3
X	koncentracija čestica u influentu, $\frac{g}{m^3}$
X_{MLVSS}	ukupna koncentracija MLVSS u eracionom bazenu, $g\ VSS/m^3$
$X_{o,i}$	koncentracija bionerazgradivih partikulativnih organskih materija koje dolaze sa influentom, mg/L
X_w	koncentracija čestica u izlaznoj struji mulja, $\frac{g}{m^3}$
x_{O_2}	maseni udeo kiseonika u vazduhu, $0,2318\ kg\ O_2/kg\ vazduha$
Y	prinos biomase po utrošenom supstratu, $g\ biomase/g\ supstrata$
Y_n	prinos nitrifikacionih bakterija po utrošenom supstratu (azotu), mg/mg
y_{O_2}	zapreminski udeo kiseonika u vazduhu, m^3/m^3
Z	naelektrisanje jona

Grčka slova

α	korekcionni faktor koji se odnosi na uticaj geometrije i stepena mešanja na prenos mase kiseonika u otpadnoj vodi, $0,8 - 0,9$
α	korekcionni faktor, $\alpha = \frac{k_{La}(\text{otpadna voda})}{k_{La}(\text{čista voda})}$
β	konstanta zavisna od tipa nataloženog materijala; $\beta = 0,04$ za granulisani materijal, $\beta = 0,06$ za slepljen muljevit materijal
β	korekcionni faktor koji pokazuje uticaj rastvorenih i suspendovanih materija u otpadnoj vodi na prenos mase kiseonika u otpadnu vodu, uobičajna vrednost je $0,70 - 0,98$ ali se najčešće koristi $0,95$
γ	koeficijent aktivnosti i-tog jona
$\Delta h_{1..4}$	debljina pojedinih slojeva između dva definisana udela čestica koje se talože, m
μ	specifična brzina rasta, h^{-1}
μ	viskozitet vode, $kg/m \cdot s$
μ_m	maksimalna specifična brzina mikrobnog rasta, h^{-1}

vi |

μ_{mn}	maksimalna specifična brzina rasta nitrifikacionih bakterija, h^{-1}
μ_n	specifična brzina rasta nitrifikacionih bakterija, h^{-1}
η_m	masena efikasnost potrošnje kiseonika, $kg\ O_2/kg\ BOD$
ρ_p	gustina čestica, kg/m^3
ρ_v	gustina vazduha, na normalnim uslovima $1,204\ kg/m^3$
ρ	gustina vode (ili bilo kog drugog fluida), kg/m^3
θ	temperaturni korekcionni faktor i za otpadnu vodu njegova vrednost se najčešće uzima kao 1,024
θ	ugao pod kojim je rešetka postavljena u odnosu na horizontalu,
θ	vreme zadržavanja čestica, d
τ	hidrauličko vreme zadržavanja otpadne vode u bioreaktoru, h

Lista skraćenica

<i>BOD</i>	biološka potrošnja kiseonika
<i>pBOD</i>	partikulativni oblik BOD
<i>sBOD</i>	rastvorni oblik BOD
<i>UBOD</i>	ukupna biohemijska potrošnja kiseonika
<i>BPK</i>	biološka potrošnja kiseonika
<i>COD</i>	hemijska potrošnja kiseonika
<i>bCOD</i>	ukupna biorazgradiva frakcija organskog zagađenja
<i>bsCOD</i>	biorazgradiva rastvorena frakcija COD
<i>nbsCOD</i>	biološki nerazgradiva frakcija COD
<i>pCOD</i>	partikulativni oblik COD
<i>rbCOD</i>	brzo-biorazgradiva frakcija COD
<i>sCOD</i>	rastvorena frakcija COD
<i>sbCOD</i>	sporo-biorazgradiva frakcija COD
<i>VOCs</i>	isparljiva organska jedinjenja
<i>ES</i>	broj ekvivalentnih stanovnika
<i>HPK</i>	hemijska potrošnja kiseonika (=COD)
<i>LSI</i>	Langelierov indeks
<i>MLSS</i>	koncentracija svih suspendovanih materija u otpadnoj vodi
<i>MLVSS</i>	koncentracija suspendovanih volatilnih (organskih) materija u otpadnoj vodi
<i>RI</i>	Riznerov indeks
<i>TOC</i>	ukupni organski ugljenik

Konvezioni faktori za korišćene jedinice za pritisak van SI sistema

1 atm	=	101325 Pa
1 bar	=	100000 Pa
1 mmHg	=	133,32 Pa
1 mmH ₂ O	=	9,81 Pa

1. OPŠTE KARAKTERISTIKE OTPADNIH VODA

Otpadne vode su vode koje su prošle kroz neki upotrební ciklus i postale štetne po životnu sredinu. Po mestu nastanka dele se na sanitarne i industrijske otpadne vode. Kada se pomešaju sanitarne i industrijske, nastaju komunalne otpadne vode. Pored njih postoje i atmosferske otpadne vode, koje se posle padavina prikupljaju i odvođe ka određenom prirodnom recipijentu. Sve ove otpadne vode se karakterišu svojim kvalitetom i količinama, a što zavisi od mnogih faktora, poput podneblja, ljudske delatnosti, stepena razvoja, kulture, navika ljudi i drugog. Postoje i određene sličnosti u kvalitetu, kada je reč o sanitarnim i atmosferskim otpadnim vodama, kao i industrijskim otpadnim vodama pojedinih srodnih industrijskih grana.

Nezavisno od toga kako i gde nastaju, otpadne vode se moraju prečistiti, ukoliko njihov kvalitet izlazi izvan zakonom predviđenih okvira.

Nadležni državni organi donose norme kvaliteta i kvantiteta otpadnih voda, sa osnovnim ciljem da zaštite sopstvene vodne resurse i zemljište od potencijalnog zagađenja, do koga može doći pri njihovom nekontrolisanom ispuštanju u životnu sredinu.

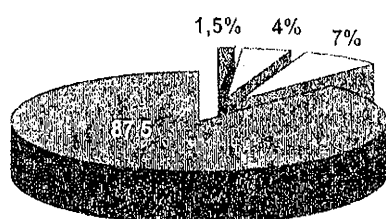
Količina otpadnih voda zavisi od ukupne potrošnje vode u određenoj sredini. Ukupnu potrošnju vode shodno svom stepenu razvoja, propisuje država putem planskih dokumenata kroz tzv. *norme potrošnje vode*. Na taj način se mogu praviti planovi o ukupno potrebnim kapacitetima kako za vodosnabdevanje, tako i za prečišćavanje otpadnih voda.

U okviru norme potrošnje vode, obično se utvrđuju sledeći približni udeli:

- 45% koriste domaćinstva
- 30% industrijska potrošnja
- 25% komercijala, javna potrošnja i gubici na mreži

Na osnovu norme potrošnje i procenjenih količina vode, okvirno se može pretpostaviti da skoro 80% od ukupne količine vode, odlazi kao otpadna voda.

Na primeru Srbije, gde se usled negativnih promena privrednog razvoja, sa nekadašnjih pretpostavki da će u drugoj deceniji dvadesetprvog veka norma potrošnje po stanovniku biti 600 L/dan, trenutno se troši približno 200 L na dan. I sa tako smanjenom potrošnjom u odnosu na predviđanja, usled slabije razvijenosti komunalne infrastrukture i činjenice da je u ovom trenutku tek oko 33% stanovništva povezano na gradsku kanalizacionu mrežu, svakoga dana se nekontrolisano u zemljište izlije i do million kubnih metara otpadne vode. Ostatak, vode koji se prikupi kroz gradske kanalizacione sisteme, usled veoma malog broja funkcionalnih postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda ispušta se u vodotokove bez ikakvog tretmana.



Slika 1.1. Izgrađena postrojenja za tretman otpadnih voda u Srbiji

Prema trenutno važećim podacima, tek negde oko 1,5 % potreba u pogledu prečišćavanja otpadnih voda u Srbiji se preradi na zadovoljavajući način, slika 1.1. Sa primarnim stepenom obrade se prečisti oko 4 %, dok je preko 7 % nekada instalisanih kapaciteta, zbog nestručnog rukovanja i nepoznavanja procesa, prekinulo sa radom ili nije do kraja izgrađeno i pušteno u rad. Ostatak od gotovo 87,5 % nije ni razmatran, tako da se voda ispušta bez ikakvog tretmana. Ovo nanosi ogromnu štetu životnoj sredini i stvara mnogostruke probleme kako u ekološkoj, tako i u socijalno-ekonomskoj sferi, pošto je tretman otpadnih voda postao ogledalo civilizacijskog nivoa koji je određeno društvo dostiglo.

Istovremeno ovo govori da postoji, sa jedne strane ogroman tehnički i finansijski problem da se sve ovo reši i Srbija pridruži razvijenim zemljama, a sa druge strane pokazuje i da postoji ogromno tržište za one koji se ovom problematikom bave ili žele da u njenom rešavanju učestvuju.

Da bi se pristupilo tretmanu otpadnih voda, neophodno je poznavati mesto gde otpadne vode nastaju ili se prikupljaju, njihove količine i fizičko-hemijske i biološke karakteristike. Kvalitetno opisivanje otpadne vode, sa što većem brojem parametara i njihovih promena tokom vremena je preduslov za pravilan izbor tehnologije koja će se primeniti za njeno prečišćavanje.

1.1. Tipovi otpadnih voda

Otpadne vode iz domaćinstava

Ova vrsta otpadnih voda zagađena je humanim otpadom (feces i urin), otpadom od pripreme obroka, pranja rublja i higijenskog održavanja stambenog prostora. One sadrže supstance u obliku pravih rastvora, koloidne rastvore – ne taložive supstance, suspendovane i plivajuće supstance (delimično usitnjen feces, papir, biljne delove). One su sličnog sastava i u principu su štetne za okolinu, pre svega zbog prisustva patogenih mikroorganizama, prvenstveno humanog porekla (feces, urin, mukus), sredstava za dezinfekciju i tenzida. Količina otpadnih voda domaćinstva zavisi od veličine naselja i potrošnje vode po glavi stanovnika, a što je vezano za kulturološki nivo određene zajednice.

Industrijske otpadne vode

Industrijske otpadne vode su raznovrsne po svojim karakteristikama što je posledica njihovog porekla, tj. vrste prisutnog zagađenja. One su u principu znatno zagađenije i stepen njihovog zagađenja može biti čak i nekoliko stotina puta veći od sanitarnih otpadnih voda, što zavisi od tipa industrije i količina otpadnih voda koje ona proizvodi. Sa tehnološkim promenama u proizvodnji, javile su se i promene u komponentama koje se ispuštaju, pa se samim tim i karakteristike otpadnih voda menjaju, tako da postaju sve zagađenije. U odnosu na ostale, hemijska industrija, uključujući i farmaceutsku, je sa najvećim stepenom potrošnje ali i zagađenja koje unosi u otpadnu vodu. Ukoliko se direktno ispuštaju u prirodne vodoprijemnike, industrijske otpadne vode se obavezno, pre ispuštanja, moraju prečistiti do zakonom propisanog nivoa. Ukoliko se ispuštaju u gradsku kanalizaciju, moraju se u krugu industrijskog pogona prečistiti do nivoa kojim neće značajno narušiti kvalitet sanitarnih otpadnih voda sa kojima se mešaju u kanalizacionom sistemu (predtretman industrijskih otpadnih voda). Ovo se mora uraditi pošto veliki broj jedinjenja generisanih u industriji teško može da se preradi na postrojenjima za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda. Nivo kvaliteta do koga se moraju prečistiti, propisuju lokalne vlasti, na području gde se industrijski pogon nalazi, a u skladu sa postojanjem i kvalitetom sistema za prečišćavanje komunalnih (gradskih) otpadnih voda. Usporedni prikaz karakteristika komunalnih i industrijskih otpadnih voda dat je u tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Usporedne karakteristike tipičnih otpadnih voda naselja i industrije

Karakteristika	Otpadne vode naselja	Otpadne vode industrije
1. Nastanak	delatnošću u domaćinstvu i fekalije	u industrijskim pogonima zbog uklanjanja otpada i rastura sirovina i proizvoda
2. Količina	uslovljena životnim standardom, ograničeno varira	uslovljena vrstom industrije, jako varira
3. Fizička svojstva	ujednačena	jako variraju
4. Hemijski sastav	ujednačen, preovlađuju biorazgradljive supstance	veoma različit, od biorazgradljivih, preko bionerazgradljivih do toksičnih supstanci
5. Reakcija	neutralna ili slabo bazna	jako se razlikuje
6. Toksičnost	nije karakteristična	izražena u različitom stepenu
7. Higijenski značaj	opšte sanitarni i epidemiološki	obično sanitaran, često toksikološki, ređe epidemiološki
8. Postupak prečišćavanja	mehanički i biološki sa dezinfekcijom	veoma različiti (mehanički, hemijski, biološki, kombinacije)

1.2. Količine otpadnih voda

Da bi se pristupilo tretmanu (prečišćavanju) otpadnih voda, neophodno je poznavati, pre svega, njenu količinu. Pri određivanju količine otpadne vode, moraju se uzeti u obzir svi mogući parametri koji na tu vrednost utiču, a među njima su osnovni:

- broj stanovnika,
- geografski položaj regiona,
- razvijenost i delatnost društva,
- klimatski uslovi i
- stanje infrastrukture.

Takođe, vezano za stanje infrastrukture, može se javiti infiltracija, bilo iz kanalizacionih sistema ka zemljištu, ili pojavom podzemnih voda, njihovom infiltracijom u kanalizacioni sistem. Infiltracija podzemnih voda povećava kvalitet otpadnih voda, jer ih razblažuje, međutim, u isto vreme zahteva veće kapacitete za preradu. U nekim slučajevima to povećanje kvaliteta može loše uticati na rad sistema, koji zahteva određenu minimalnu količinu zagađenja, kako bi on radio u kontinuitetu i zadržao efikasnost i u slučajevima kada bi se uslovi promenili i pogoršao kvalitet dolazeće otpadne vode. U zavisnosti od načina merenja i predstavljanja podataka nivo infiltracije se može kretati u granicama od:

200 – 2,800 L/(ha · d) ili

8,600 – 24,000 L/(km cevovoda · d)

i sa tim treba računati pri gradnji sistema za tretman otpadnih voda.

U zavisnosti od aktivnosti stanovništva, količina otpadne vode može varirati, pa je neophodno poznavati sledeće veličine:

- *srednja dnevna količina*, dobija se na osnovu godišnjih bilansa i veoma je važan parametar za projektovanje sistema;
- *maksimalna dnevna količina*, određuje se praćenjem promena dnevne količine otpadne vode, u toku 24 časa, tokom godišnjeg ciklusa. Ovaj parametar služi za određivanje vremena zadržavanja vode u sistemu, a što je važna veličina za većinu tehnoloških postupaka;

- *minimalna dnevna količina*, određuje se na osnovu godišnjeg bilansa za ukupno 24 časa sa najmanjim vrednostima količine otpadne vode. Bitan parametar za projektovanje sistema gde se suspendovani čvrsti materijal mora odnositi sa vodom iz sistema, da ne bi došlo do njihovog taloženja na neželjenim mestima.

Za približno predviđanje količine vode koju treba prečistiti na postrojenju za prečišćavanje, mogu poslužiti podaci o potrošnji vode, koja se kreće u širokom opsegu, kao što je dato u tabeli 1.2.:

Tabela 1.2. Prosečna potrošnja vode u domaćinstvu i industriji

Oblast	Jedinica mere za koju se voda potroši	Količina potrošene vode
Aktivnost ljudi		
Piće, kuvanje, pranje	čovjek/dan	20 – 30 L
Pranje rublja	čovjek/dan	10 – 15 L
Kupanje u kadi	jedno	150 – 200 L
Pranje automobila	jedno	200 – 300 L
Polivanje ulica i parkova	1 m ²	2 – 3 L
Industrija:		
Šećerane	100 kg repe	1,5 – 2 m ³
Klanice	1 zaklano goveče	4 – 5 m ³
Mlekare	1 L mleka	3 – 6 L
Pivare	1 L piva	5 – 10 L
Fabrika celuloze	1 kg bukove celuloze	oko 400 L
Fabrika papira	1 kg finog papira	400 – 600 L

1.3. Karakteristike otpadnih voda

Stepen negativnog uticaja otpadnih voda na prirodne vode u koje se ispuštaju, zavisi od stepena njihove zagađenosti. Za određivanje stepena zagađenosti otpadne vode služe *parametri kvaliteta* otpadnih voda, odnosno, u nekim slučajevima *indikator zagađenosti*. Broj parametara kojima se definiše zagađenost vode je velik, posebno kod industrijskih otpadnih voda. Međutim, za polazno utvrđivanje vrste i stepena zagađenosti na osnovu kojeg se voda može dalje tretirati, dovoljan je manji broj značajnih parametara, koji su poznati kao *parametri opšteg karaktera*. Nakon toga se, prema potrebi, proširuje broj parametara u okviru detaljnije analize, na primer, vrste organskog zagađenja (posebno toksičnih i biorezistentnih), vrste neorganskog zagađenja (posebno teških metala) i drugi koji ulaze među *parametre specifičnog karaktera*.

Rastvorene i suspendovane supstance u otpadnim vodama sadrže i organske i neorganske supstance. Organske supstance uključuju: ugljene hidrate, masti, proteine, površinski aktivne supstance, pesticide i druge hemikalije korišćene u poljoprivredi, isparljiva organska jedinjenja i neke toksične supstance. Neorganske supstance, pored inertnih materijala, peska i šljunka, uključuju i teške metale, azot i fosfor (makronutrijenti), supstance koje utiču na alkalitet, hloride, jedinjenja sumpora i mnoge druge neorganske zagađivače. Takođe, u otpadnim vodama mogu biti prisutni gasovi: ugljen-dioksid, azot, kiseonik, vodonik-sulfid, metan i dr.

Biološke karakteristike otpadnih voda se najčešće vezuju za prisustvo bakterija, plesni, protozoa, mikroskopskih biljaka i životinja, ali i raznih virusa humanog ili animalnog porekla. Neki od njih su neophodni za biološku obradu otpadnih voda, dok neki mogu biti i veoma štetni po zdravlje ljudi ukoliko se nađu u prirodnim recipientima, pa ih je neophodno ukloniti.

Karakteristike otpadnih voda mogu se podeliti u četiri osnovne grupe, i to:

- fizičke karakteristike (ukupna suva supstanca, ukupne suspendovane supstance, ukupne rastvorene supstance, inertne i isparljive supstance),
- hemijske karakteristike (ukupan azot, ukupan fosfor, organske supstance...),

- biološke karakteristike (bakterijski indikatori, ukupan broj koliformnih bakterija, broj fekalnih koliformnih bakterija i broj fekalnih streptokoka) i
- specifični indikatori zagađenosti (biohemijska i hemijska potrošnja kiseonika, ukupni sadržaj ugljenika i broj ekvivalentnih stanovnika, *ES*).

1.3.1. Fizičko-hemijske karakteristike otpadnih voda

Temperatura

Temperatura otpadne vode je značajan parametar koji utiče na rastvorljivost gasova, brzinu hemijskih reakcija, biološku aktivnost itd. Visoka temperatura otpadne vode predstavlja termalno zagađenje koje negativno deluje na živi svet u vodoprijemnicima (industrija i termoelektrane). Njena vrednost se može meriti diskontinualno, primenom digitalnih merača temperature ili kontinualno, ukoliko postoji centralni sistem za kontrolu i regulaciju procesa (akvizicioni sistem za prikupljanje i obradu podataka).

Mutnoća

Mutnoća predstavlja sposobnost vode da propušta svetlost. Smanjenje prozirnosti vode potiče od apsorpcije i rasipanja svetlosti od strane suspendovanih i koloidnih čestica (čestice gline, mulja, organske čestice, mikroorganizmi itd.). Merenje mutnoće otpadne vode se zasniva na poređenju sposobnosti propuštanja svetlosti uzorka otpadne vode i referentnog rastvora, pri istim uslovima, a rezultati se izražavaju u *NTU* jedinicama (*Nephelometric Turbidity Units*).

Boja

Sveža otpadna voda je najčešće svetle braon-sive boje. Kako vreme odmiče i voda putuje kroz kanalizacioni sistem, stvaraju se anaerobni uslovi. Boja se menja od sive ka tamno sivoj i konačno ka crnoj. Crna otpadna voda se opisuje kao septična. U većini slučajeva siva, tamno siva i crna potiču od stvaranja sulfida metala koji se formiraju u anaerobnim uslovima. Boja otpadne vode se može meriti spektrofotometrijski, merenjem apsorpcije zračenja na različitim talasnim dužinama.

Električna provodljivost

Električna provodljivost je sposobnost vode da provodi električnu struju. Njen intenzitet zavisi od količine prisutnih jona, pokretljivosti, naelektrisanja jona i temperature sistema. Izražava se u jedinicama $\mu S/cm$ i služi za posredno određivanje prisustva rastvorenih komponenti u vodi.

Sadržaj čvrstih materija u otpadnoj vodi

Određivanje sadržaja čvrstih materija u otpadnim vodama je veoma važno jer se na osnovu tog podatka i oblika u kome se one nalaze može predvideti određeni vid tretmana. Čvrsta faza u otpadnim vodama može biti u rastvorenom i u suspendovanom obliku, slika 1.2.

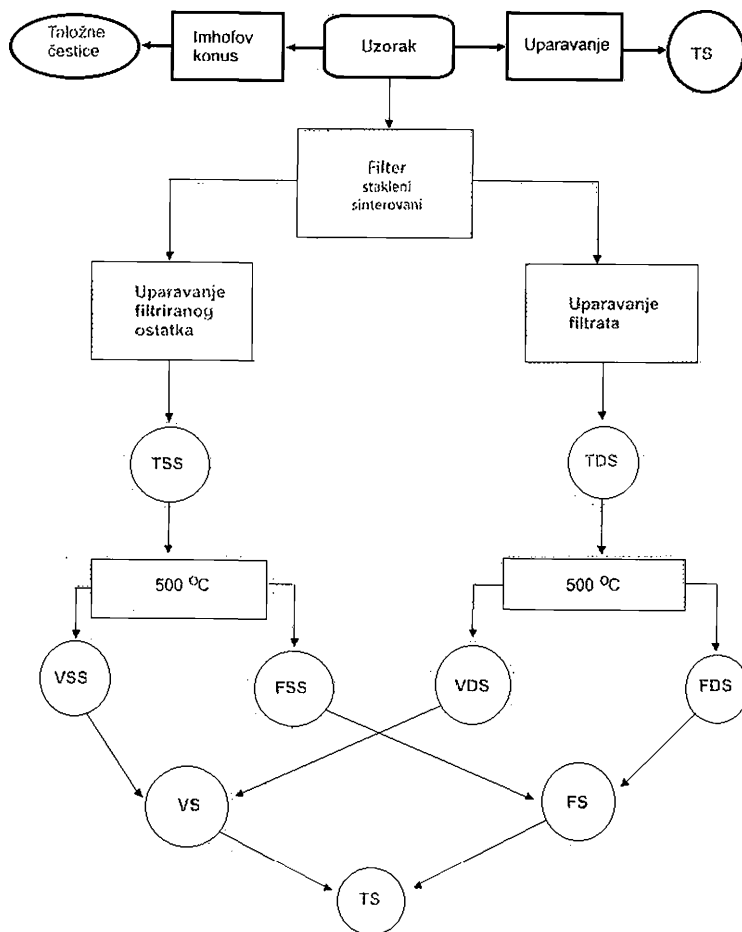
Čvrste materije koje su u rastvorenom obliku se označavaju sa *TDS* (od engleskih reči *total dissolved solids*), i to su sve materije koje su kao filtrat prošle kroz filter, a potom su uparavanjem, na 105 °C odvojene od ostatka vode.

U frakciji koja je preostala nakon uparavanja, mogu se nalaziti organske komponente, koje će, nakon izlaganja temperaturi od 500 °C, otpariti, pa se stoga nazivaju isparljive (volatilne) rastvorene materije i označavaju sa *VDS* (*volatile dissolved solids*) i deo inertnog neorganskog materijala koji se označava sa *FDS* (*fixed dissolved solids*).

Na isti način, deo koji ostaje na filtru, čine čvrste čestice koje su bile u suspendovanom stanju u otpadnoj vodi i njihova masa, nakon sušenja, predstavlja količinu ukupnih suspendovanih čestica, označenu sa *TSS* (*total suspended solids*). Ponavljanjem iste procedure, izlaganjem uzorka temperaturi od 500 °C, mogu se razdvojiti isparljiva organska (*VSS*, *volatile suspended solids*) i neorganska frakcija (*FSS*, *fixed suspended solids*). Zbir svih frakcija daje ukupni sadržaj čvrste faze u otpadnoj vodi, *TS* (*total solids*), a čija se vrednost može odmah odrediti uparavanjem uzorka otpadne vode na 103 – 105 °C. Poznavanje vrednosti svih frakcija čvrste faze u otpadnoj vodi je značajno jer pruža početnu informaciju o potrebnom tretmanu za njihovo uklanjanje.

U terminologiji koja se koristi u tretmanu otpadnih voda, pravi se razlika između ukupno isparljivih organskih materija i volatilnih organskih materija. Naime u samoj otpadnoj vodi mogu biti prisutne ili mogu nastati kao proizvod metaboličkih aktivnosti mikroorganizama različite frakcije organskih jedinjenja, kako onih koje su lako isparljive i na niskim

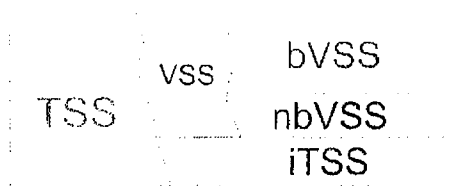
temperaturama i koje tokom tretmana mogu ispariti iz otpadne vode, tako i onih koje su teže isparljive (isparavaju u intervalu od 105-500 °C). Upravo ove teže isparljive organske komponente i čine osnovni organski sadržaj koji je potrebno određenim tehnološkim postupkom ukloniti iz otpadne vode i da bi se pravila razlika u odnosu na ukupne isparljive organske materije, koristi se izraz volatilne materije, pošto u našem jeziku ne postoji izraz kojim bi se pravila ova razlika.



Slika 1.2. Šematski prikaz frakcija čvrstih materija u otpadnim vodama

Pored ovih vrednosti, važna veličina koja se odnosi na suspendovane čestice u otpadnoj vodi je količina taložnih čestica. Ona se eksperimentalno određuje korišćenjem tzv. Imhofovog (*Imhoff*) levka, primenom standardne analitičke procedure, a predstavlja udeo suspendovanih čestica koje se mogu istaložiti, što je značajan podatak za izbor daljeg tretmana.

U tretmanu otpadnih voda, posebno je važna frakcija ukupnih suspendovanih čestica u otpadnoj vodi (*TSS*). U sistemima za biološko prečišćavanje otpadnih voda, mikroorganizmi, koji se nalaze u suspendovanom stanju, tokom procesa, povećavaju svoju koncentraciju i zajedno sa ostalim prisutnim suspendovanim česticama čine aktivni mulj. Kako su ćelije mikroorganizama sastavljene pretežno od isparljivih organskih (volatilnih) materija, to se oni i razmatraju kao frakcija volatilnih suspendovanih čestica (*VSS*). Njih je neophodno izdvojiti taloženjem iz otpadne vode pre ispuštanja u vodotok, pa je stoga i potrebno poznavati njihovu količinu, kako bi se procenila količina nastalog mulja. Struktura prisutnih frakcija ukupnih suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, predstavljena je na slici 1.3.



Slika 1.3. Frakcije suspendovanih čestica u otpadnoj vodi

Pored volatilnih čestica (organski sastav), u suspendovanom obliku se mogu naći i inertne, neorganske čestice (*iTSS*). U okviru organskog dela, u vodi se mogu naći biorazgradive organske suspendovane čestice (*bVSS*), kao i bionerazgradive organske suspendovane čestice (*nbVSS*). Ovi podaci su posebno važni za izbor tretmana viška mulja koji nastaje tokom procesa biološke obrade otpadne vode.

pH

Vrednost *pH* ima veliki značaj za hemijske i biološke procese u vodi. Tretiran efluent koji se ispušta u vodoprijemnik mora da ima *pH* –vrednost od 6,5 do 8,5.

Miris

Mirisi u otpadnim vodama su uglavnom posledica izdvajanja gasova koji su nastali razgradnjom prisutnih organskih materija. Karakteristični jedinjenja od kojih najčešće potiču mirisi u otpadnoj vodi, na žalost obično neprijatni, prikazana su u tabeli 1.3.

Tabela 1.3. Jedinjenja koja doprinose mirisu otpadnih voda

Jedinjenja	Hemijska formula	Opis neprijatnog mirisa
Amini	CH_3NH_2 ili $(\text{CH}_3)_3\text{N}$	miris na ribu
Amonijak	NH_3	prepoznatljiv oštar miris
Diamini	$\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2$ ili $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2$	miris na trulo meso
Vodonik-sulfid	H_2S	miris na pokvorena jaja
Merkaptani	CH_3SH ili $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{SH}$	miris tvora
Organski sulfidi	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$, CH_3SSCH_3	miris na truli kupus
Skatol	$(\text{C}_8\text{H}_5\text{NHCH}_3)$	miris fekalija

Kontrola mirisa i naročito vodonik-sulfida (H_2S) je veoma bitna pri radu sistema za prečišćavanje jer ispuštanje velike količine H_2S dovodi do ubrzane korozije betonskih delova postrojenja, opreme i stvaranja nepoželjnih mirisa. Kontrolu mirisa i sprečavanje njegovog širenja je potrebno vršiti zbog smanjenja neprijatnog efekta po okolinu u blizini postrojenja i to se postiže prekrivanjem delova postrojenja, obezbeđenjem kvalitetne ventilacije i tretmana izlaznih gasova. Prisustvo lako isparljivih organskih jedinjenja (*VOC*) i isparljivih toksičnih organskih jedinjenja (*VTOC*) u otpadnim vodama zahteva, takođe, prekrivanje postrojenja i instaliranje objekata za preradu ovih jedinjenja pre ispuštanja u atmosferu.

Alkalitet

Potiče od prisustva OH^- -jona, karbonata, bikarbonata i amonijaka. Najčešće su prisutni bikarbonati kalcijuma i magnezijuma. Povećanju alkaliteta doprinosi i prisustvo borata, silikata i fosfata. Određuje se da bi se definisao stepen moguće promene *pH*-vrednosti usled stvaranja ili unosa kiselina tokom procesa prečišćavanja. Otpadna voda je obično

bazna i to može imati uticaj na sprovođenje hemijskog i biološkog tretmana. Alkalitet se određuje titracijom uzorka vode kiselinom poznate koncentracije, a rezultat se iskazuje preračunavanjem preko koncentracije kalcijum- karbonata, najčešće izraženog u $mg\ CaCO_3/L$.

Azot

Azot i fosfor su esencijalni elementi za rast mikroorganizama, biljaka i životinja i poznati su nutrijenti ili biostimulansi. Veoma male količine drugih elemenata, poput gvožđa, takođe su potrebni za biološki rast, ali su azot i fosfor, u većini slučajeva, kao nutrijenti od najveće važnosti. Stoga se njihovoj koncentraciji u otpadnoj vodi mora posvetiti posebna pažnja. Pošto je azot neophodan element u sintezi proteina, podaci o sadržaju azota moraju se posebno pratiti pri biološkom tretmanu otpadnih voda. Smanjen sadržaj ili odsustvo azota zahteva da se u nekim slučajevima otpadnoj vodi dodaje i veštačko đubrivo (*NPK*), radi obezbeđenja dovoljne koncentracije azota. Hemija azota je kompleksna, zbog toga što se javlja u različitim oksidacionim stanjima, a što utiče na živi svet u vodi. Najznačajniji oblici azota u otpadnoj vodi i njihova oksidaciona stanja su amonijak [$NH_3, (-III)$], amonijum-jon [$NH_4^+, (-III)$], azot-suboksid [$N_2O, (+I)$], nitrit-jon [$NO_2^-, (+III)$] i nitrat-jon [$NO_3^-, (+V)$]. Oksidaciono stanje azota u većini organskih jedinjenja je $-III$. Organske frakcije sastoje se od kompleksnih mešavina koje uključuju amino kiseline, amino šećere i proteine (polimere amino kiselina). Komponente koje su uključene u organske frakcije mogu biti rastvorene ili suspendovane. Azot, u ovim komponentama, se lako konvertuje u amonijum-jon uz pomoć mikroorganizama.

Fosfor

Fosfor je nutrijent značajan za rast algi i drugih bioloških organizama koji mogu dovesti do eutrofikacije. Komunalne otpadne vode mogu da sadrže od 4 do 16 mg/L fosfora, a uobičajni oblici fosfora koji su pronađeni u vodenim rastvorima uključuju neorganske fosfate, polifosfate i organski fosfat.

Sumpor

Sumpor učestvuje u sintezi proteina i oslobađa se pri njihovom razlaganju. Biološki se redukuje u anaerobnim uslovima do sulfid-jona, koji grade vodonik-sulfid. Akumulacija vodonik-sulfida je štetna, pošto izaziva koroziju koja može da ugrozi strukturu delova opreme na postrojenju i u čevima za transport otpadne vode.

Metali u otpadnoj vodi

U otpadnim vodama se najčešće mogu naći kadmijum, hrom, bakar, gvožđe, olovo, mangan, živa, nikal i cink. Većina ovih metala je kvalifikovana kao primarni polutant, ali su neki od njih neophodni za održavanje biološkog života u vodi. Sa druge strane, prisustvo navedenih metala u većim koncentracijama može izazvati toksične efekte po živi svet, pa je njihova kontrola obavezna pri karakterizaciji otpadnih voda.

Gasovi

Gasovi koji su najčešće prisutni u netretiranim otpadnim vodama su azot, kiseonik, ugljen-dioksid, vodonik-sulfid, amonijak i metan. Prva tri su prisutna u atmosferi pa se nalaze u svim vodama. Druga tri su proizvodi koji nastaju razlaganjem organskih materija prisutnih u vodi i moraju se posebno razmatrati iz bezbednosnih i zdravstvenih razloga. Iako se ne nalaze u netretiranim otpadnim vodama, hlor i ozon se koriste za dezinfekciju i kontrolu mirisa, pa je potrebno njihovo praćenje u efluentu.

Pored toga, oksidi sumpora i azota javljaju se u procesima sagorevanja koji se u pojedinim slučajevima mogu koristiti pri tretmanu nekih industrijskih otpadnih voda, kao i u procesu spaljivanja mulja nakon prečišćavanja komunalnih otpadnih voda. Pri anaerobnoj razgradnji organskih materija u otpadnim vodama nastaje metan. To je gas bez boje, mirisa, lako zapaljiv i sa velikom energetsom vrednošću. U otpadnoj vodi koja ima dodir sa kiseonikom iz vazduha ne može nastati metan, jer je i najmanja količina rastvorenog kiseonika u vodi toksična za mikroorganizme koji ga proizvode, tako da on, u većim količinama, nastaje samo na postrojenjima za tretman otpadnih voda u striktno anaerobnim uslovima. Pošto je metan visoko zapaljiv gas, postoji veliki rizik od eksplozije, pa se o tome mora voditi računa pri anaerobnoj obradi otpadnih voda. U postrojenju gde nastaje metan treba da postoje obaveštenja o opasnosti od eksplozije, a zaposleni moraju da budu obučeni o sigurnosnim i preventivnim merama zaštite.

Rastvoreni kiseonik

Jedan od najvažnijih parametara kvaliteta vode jeste koncentracija rastvorenog kiseonika. Iako je slabo rastvorljiv u vodi, od velikog je značaja u oksidacionim i biološkim postupcima prečišćavanja otpadnih voda. Kao i kod drugih gasova i rastvorljivost kiseonika u vodi je obrnuto

proporcionalan temperaturi i maksimalna količina kiseonika koji može biti rastvorljiv u vodi na 0 °C je 14,6 mg/L. Vrednost zasićenja opada brzo sa porastom temperature vode, kao što je prikazano u tabeli 1.4.

Tabela 1.4. Rastvorljivost kiseonika u vodi u zavisnosti od temperature

Temperatura (°C)	Koncentracija rastvorenog kiseonika u vodi (mg/L)
0	14,6
2	13,8
4	13,1
6	12,5
8	11,9
10	11,3
12	10,8
14	10,4
16	10,0
18	9,5
20	9,2
22	8,8
24	8,5
26	8,2
28	8,0
30	7,6

Količina kiseonika rastvorenog u vodi obično se, u radnim uslovima, meri pomoću kiseonične elektrode, dok se kao standardna metoda koristi jodometrijska titracija tj. Vinklerov test (*Winkler*).

Ulja i masti

Pod ovim nazivom podrazumevaju se masti, ulja, vosak i ostala slična jedinjenja koja se nalaze u otpadnoj vodi. Po hemijskom sastavu to su estri glicerola i viših masnih kiselina. U otpadnu vodu dospevaju bilo iz industrijskih pogona koji ih proizvode ili koriste u proizvodnji ili iz domaćinstava, kao ostaci hrane. U sanitarne otpadne vode dospevaju tokom pripreme hrane i korišćenja putera, margarina, biljnih masti i ulja. Masti se, pored toga, najčešće mogu naći u mesu, klicama žitarica, semenu, orahu kao i u određenom voću. Sintetska ulja, kerozin, maziva i motorna ulja se dobijaju iz benzina i katrana i kao lakše komponente plivaju na površini otpadne vode. Mala rastvorljivost masti i ulja

smanjuje mogućnost njihove mikrobiološke degradacije, pa se stoga ove komponente obično odmah mehanički uklanjaju iz otpadne vode, neposredno nakon mesta nastanka, a njihova obrada se naknadno vrši anaerobnim postupcima.

Površinski aktivne supstance

Površinski aktivne supstance su veliki organski molekuli koji su malo rastvorli u vodi i koji dovode do stvaranja pene u postrojenjima za tretman otpadnih voda kao i na površinskim vodama u kojima se ispušta otpadna voda. Ove supstance su najčešće sastavljene od jednog jako hidrofobnog i jednog jako hidrofilnog dela. Hidrofobnu grupu obično čini ugljovodonični radikal, (R), od 10 do 20 ugljenikovih atoma. Obično se koriste dva tipa hidrofobnih grupa, one koje jonizuju i one koje ne jonizuju u vodi. Anjonske površinski aktivne supstance su negativno naelektrisane, na primer, $[(RSO_3N)^-Na^+]$, dok su katjonske površinski aktivne materije pozitivno naelektrisane, $[(RMe_3N)^+Cl^-]$. Površinski aktivne supstance koje ne jonizuju sadrže polioksietilen hidrofilnu grupu, $-OCH_2CH_2-$, u ukupnoj strukturi $ROCH_2CH_2OCH_2CH_2 \dots \dots \dots OCH_2CH_2OH$. Ove materije se nalaze na granici između vode i vazduha i teže da svoj hidrofilni deo zadrže u vodi, a hidrofobni deo u vazduhu i na taj način, tokom aeracije, zadržavaju se na površini mehura, formirajući stabilnu penu. Ovo je u tretmanu otpadnih voda veoma nepoželjan efekat pošto pena sprečava prenos mase kiseonika u sistemu, pa povećano prisustvo površinski aktivnih supstanci u otpadnoj vodi može umanjiti ukupan efekat tretmana.

Ukupan organski sadržaj

Organska jedinjenja koja se nalaze u otpadnoj vodi, većinom su sastavljena od ugljenika, vodonika, kiseonika i azota. U otpadnim vodama se sreću uglavnom proteini 40 – 60 %, ugljeni hidrati 25 – 50 %, ulja i masti 8 – 12 %. Urea, kao glavni sastojak urina, dospeva u otpadnu vodu ali se brzo razlaže do amonijum-karbonata i kasnije se ne može detektovati. Osim prirodnih organskih, u malim količinama se mogu naći i različite sintetičke organske supstance, kako jednostavne, tako i složene strukture, čije uklanjanje iz otpadnih voda može predstavljati poseban problem. Neka od tih jedinjenja su prikazana u tabeli 1.5.

Isparljiva organska jedinjenja (VOCs)

Organska jedinjenja koja imaju tačku ključanja manju od 100 °C ili napon pare veći od 1 mm Hg na 25 °C svrstavaju se u grupu isparljivih organskih jedinjenja (VOCs). Vinil hlorid, koji ima taču ključanja –13,9 °C i napon pare 2548 mm Hg na temperaturi 25 °C, primer je veoma isparljivog organskog jedinjenja. Pri rukovanju postrojenjima za tretman otpadnih voda, mora se posebno voditi računa o eventualnoj pojavi ovih opasnih materija koje mogu ugroziti zdravlje zaposlenih na postrojenju ili životnu sredinu i preduzimati preventivne mere.

Tabela 1.5. Organska jedinjenja koja se mogu naći u otpadnoj vodi

Ime	Nastajanje ili izvor	Uticaj
Isparljiva organska jedinjenja	Nadjena u zemlji i površinskim vodama	Kancerogena za ljude
1,2-dibrommetan i 1,2-dibrom-3-hloropropan	Nadjena u površinskoj vodi, naročito gde se ova jedinjenja koriste kao fungicidi	Štetan efekat po ljudsko zdravlje
Trihlorometani (THMs) (Trihalometani)	Nadjeni u hlorisanoj vodi	Dezinfikuju sporedne produkte, kancerogeni za ljude
Hlorovana organska jedinjenja	Nadjena u sirovoj vodi koja dolazi iz industrije	Kancerogeni za ljude
Hlorsirćetna kiselina	Nastala hlorovanjem prirodnih organskih materija	Dezinfikuje sporedne proizvode. Potencijalno kancerogen po ljude
Trihlorfenol	Nastala hlorovanjem prirodnih organskih materija	Dezinfikuje sporedne proizvode. Dihlorsirćetna i trihlorsirćetna kiselina je kancerogena za životinje

Aldehidi	Nastaju pri ozonizaciji otpadne vode u kojoj ima organskih materija	Dezinfikuje sporedne proizvode
Ekstrahovane baze, kiseline	Aromatski ugljovodonici, ftalati, fenoli, pesticidi	Većina otrovni i kancerogeni
Fenoli	Uglavnom potiču iz industrijskih postrojenja	Škodan uticaj na zdravlje ljudi
Polihlorovani bifenil (PCB)	Prisutan u vodi koja je bila u kontaktu sa uljem iz transformatora	Otrovni i veoma stabilni u vodi
Policiklični aromatski ugljovodonik (PAHs)	Sporedni produkt rafinerijskih procesa	Mnoga jedinjenja u ovoj grupi su veoma kancerogena i na niskim koncentracijama
Karbamidni pesticidi	Nadjeni u vodi koja je bila izložena uticaju pesticida	
Organohlorni pesticidi	Nadjeni u vodi koja je bila izložena uticaju pesticida	Mnoga jedinjenja iz ove grupe su relativno stabilna, toksična i kancerogena

1.3.2. Određivanje sadržaja organskih zagađujućih materija u vodi

Analize koje se koriste za merenje organskog sadržaja u otpadnoj vodi moraju biti primenljive i za određivanje velikih koncentracija, tj. većih od $1,0 \text{ mg/L}$, a sa druge strane, posebno kada je reč o specifičnim komponentama i za koncentracije reda veličine 10^{-12} do 1 mg/L .

Za pružanje osnovne informacije o sadržaju organskih materija u otpadnoj vodi, u redu veličina velikih koncentracija, najčešće se koriste sledeće metode određivanja:

- (1) hemijska potrošnja kiseonika,

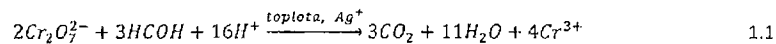
- (2) biohemijska potrošnja kiseonika i
- (3) sadržaj ukupnog organskog ugljenika.

Hemijska potrošnja kiseonika (*HPK*)

Hemijska potrošnja kiseonika (*HPK*), je mera sadržaja zagađujućih materija, najvećim delom organskog porekla, koju je moguće oksidovati pomoću jakog hemijskog oksidacionog sredstva, kalijum-dihromata ($K_2Cr_2O_7$). Potrebno je naglasiti da ne podležu sve organske materije. prisutne u vodi, oksidaciji pri određivanju hemijske potrošnje kiseonika, pa tako, na primer, benzen, aromatični ugljovodonici i piridin se ne mogu oksidovati kalijum-dihromatom ni uz prisustvo katalizatora.

Oksidacija pri standardnom *HPK* testu se radi na temperaturi ključanja, sa jako kiselim rastvorom dihromata, u prisustvu sumporne kiseline i uz dodatak jona srebra, najčešće u obliku srebro-sulfata, kao katalizatora.

Uprošćeni primer ove reakcije, gde je sa $HCOH$ predstavljena organska materija u otpadnoj vodi, dat je jednačinom 1.1:



Dihromat se dodaje u višku, a neutrošeni deo $Cr(VI)$ se određuje titracijom sa standardnim rastvorom gvožđe(II)-amonijum-sulfata. Iz utrošene količine dihromata izračunava se ekvivalent utrošenog kiseonika i na taj način dobija vrednost hemijske potrošnje kiseonika.

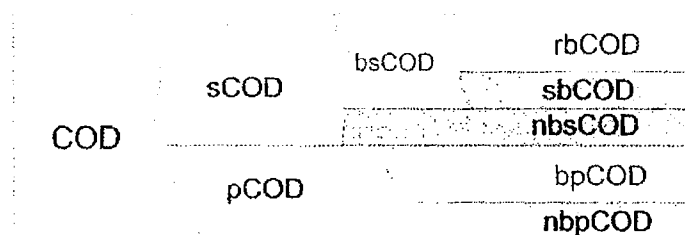
Otpadna voda koja se podvrgava *HPK* testu može u sebi sadržavati rastvorene, koloidne i suspendovane materije, na koje će se trošiti dihromat. U analizi kvaliteta otpadne vode, od velikog je značaja, pored ukupne vrednosti *HPK*, odrediti i vrednost pojedinih udela *HPK*, koji se odnose na rastvorene ili čestične komponente, na one koje su lako ili teško biorazgradive ili one koje su bionerazgradive.

Na ovaj način moguće je dobiti različiti broj kombinacija, koje sa različitim prefiksima uz oznaku za *HPK* mogu imati drugačije značenje i označavati prisustvo specifičnih materija u otpadnoj vodi. Ovo su veoma značajni podaci, sa aspekta daljeg tretmana i izbora optimalne tehnologije prečišćavanja otpadnih voda.

Da bi korisnik ovog materijala mogao da uporedi, kasnije korišćene jednačine i analizira modele u odnosu na dostupnu stranu literaturu, umesto oznake *HPK*, dalje će se za hemijsku potrošnju kiseonika

koristiti oznaka *COD*, koja u osnovi predstavlja skraćenicu od engleskog naziva *chemical oxygen demand*. Razlog za ovo drugačije označavanje, u odnosu na do sada korišćenu domaću literaturu, je u tome što upravo postoji veliki broj frakcija na koje se odnosi hemijska potrošnja kiseonika, pa bi to znatno usložilo korišćenje i povezivanje značenja određenih oznaka i veličina, u odnosu na dostupnu stranu literaturu, ukoliko bi se pravile skraćénice od izraza na našem jeziku.

Na slici 1.4 su predstavljene frakcije na koje se odnosi hemijska potrošnja kiseonika.



Slika 1.4. Frakcije hemijske potrošnje kiseonika

U okviru ukupne vrednosti hemijske potrošnje kiseonika (*COD*), jedan deo se odnosi na rastvorene frakcije (*sCOD*), a drugi deo na one koje su u otpadnoj vodi bile u čestičnom, partikulativnom obliku (*pCOD*). Rastvorna frakcija dalje u sebi može imati brzo-biorazgradivu frakciju (*rbCOD*), sporo-biorazgradivu frakciju (*sbCOD*) i biološki nerazgradivu frakciju (*nbsCOD*). Frakcije brzo i sporo-biorazgradive, zajedno čine biorazgradivu rastvorenu frakciju (*bsCOD*). Vrednost biorazgradivog rastvorenog zagađenja je od posebne važnosti pri početnoj proceni da li se u postupku prečišćavanja mogu koristiti biološki procesi ili ne.

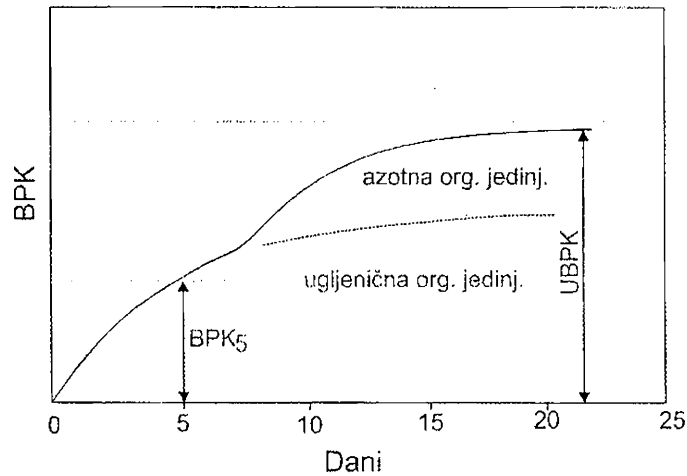
Pošto se u otpadnoj vodi mogu naći i organska zagađenja u čestičnom obliku i ona se mogu analizirati sa aspekta njihove biorazgradivosti, pa frakcija čestičnog zagađenja koja je biorazgradiva, obeležava se sa *bpCOD*, a bionerazgradiva sa *nbpCOD*.

Biološka potrošnja kiseonika (*BPK*)

Komunalne i industrijske otpadne vode sadrže velike količine organske materije u suspendovanom, koloidnom i pravom rastvoru. Deo ovih materija je podložan biološkoj oksidaciji, pri čemu se troši prisutan rastvoreni kiseonik u vodi. To dovodi do smanjenja njegove koncentracije ili čak potpunog nestanka, kada se javljaju anaerbní uslovi

u vodoprijemniku. Ovo u nekim slučajevima, može izazvati pomor akvatičnog živog sveta, anaerobno truljenje, kao i pojavu štetnih gasova (H_2S , CH_4 , NH_3 , CO_2). Količina kiseonika koju potroše mikroorganizmi za biološku razgradnju prisutnih organskih materija u vodi, tokom određenog broja dana, naziva se *biološka potrošnja kiseonika*.

U otpadnoj vodi, tokom vremena, prisutni mikroorganizmi prvo oksidišu organsku materiju čiji je osnovni konstituent ugljenik, a nakon toga, počinje oksidacija organskih materija koje sadrže azot. Eksperiment može potrajati i preko 20 dana, pa radi bržeg dobijanja informacije o stepenu organskog biorazgradivog zagađenja, usvojeno je da se kao mera uzima vrednost nakon 5 dana. Zato se ta petodnevna potrošnja kiseonika od strane mikroorganizama i označava BPK_5 . Istovremeno i taj period od 5 dana koji je potreban da se sačeka rezultat analize, predstavlja određeno ograničenje, pri analizi kvaliteta otpadne vode, posebno u slučajevima havarijskih zagađenja, pa se u takvim slučajevima koriste i druge vrste analiza.



Slika 1.5. Promena koncentracije BPK sa vremenom tokom oksidacije organskog zagađenja

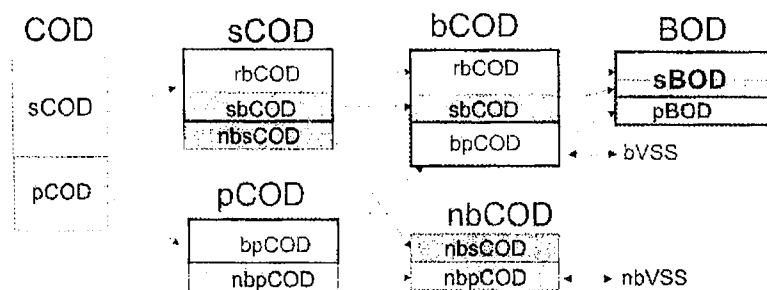
Ako se, umesto prekida BPK testa nakon 5 dana, eksperiment nastavi i meri rastvoreni kiseonik svakog dana, može se dobiti kriva poput ove prikazane na slici 1.5. Uočava se da nakon nekoliko dana trend krive kreće naglo gore, što je posledica početka potrošnje kiseonika od strane

mikroorganizama koji razlažu azotna organska jedinjenja do oblika neorganskog azota.

U inženjerskoj praksi, često se koristi i izraz *kg BPK/dan*, što predstavlja proizvod koncentracije *BPK* i dnevnog protoka otpadne vode, a što upućuje na količinu organskog zagađenja koje je potrebno ukloniti u toku jednog dana na postrojenju za tretman otpadne vode.

Da bi se prikazala veza između hemijske potrošnje i biološke potrošnje kiseonika, može poslužiti šema data na slici 1.6., pri čemu će se i ovde, slično kao i u slučaju hemijske potrošnje kiseonika, umesto oznake *BPK*, koristiti oznaka *BOD*, koja je skraćena od engleskog naziva *biochemical oxygen demand*. Razlog je sličan, pošto i biološka potrošnja kiseonika, ukazuje na različite frakcije, koje je potrebno poznavati radi određivanja potrebnog tretmana otpadne vode.

Tokom aktivnosti mikroorganizama u otpadnoj vodi troši se kiseonik na razlaganje prisutnih organskih jedinjenja koja su u rastvornom ili u partikulativnom obliku. Jedinjenja koja su rastvorena, oksidišu se lakše, dok ona koja su u partikulativnom obliku, moraju prvo da se rastvore, pa tek onda da se oksidišu. Stoga, polazeći od istih oznaka kao što je opisano kod hemijske potrošnje kiseonika, uočava se da postoje dve frakcije, rastvorni, *sBOD* i partikulativni oblik, *pBOD*, koji ulazi u sastav ukupne biološke potrošnje kiseonika. Ovo je veoma važno poznavati, jer direktno utiče na kinetiku procesa prečišćavanja otpadnih voda.



Slika 1.6. Veza između hemijske i biološke potrošnje kiseonika

Veza između vrednosti hemijske i biološke potrošnje kiseonika je data sledećim korelacijama.

$$\frac{UBOD}{BOD} = 1,5 \quad 1.2$$

$$\frac{bCOD}{BOD} = 1,6 \quad 1.3$$

$$UBOD = \frac{1,5}{1,6} bCOD \quad 1.4$$

U prethodnim jednačinama je kao *UBOD* definisana ukupna biohemijska potrošnja kiseonika, na kraju procesa, a *bCOD*, predstavlja ukupnu biorazgradivu frakciju organskog zagađenja u vodi.

Ukupni organski ugljenik (*TOC*)

Ukupni organski ugljenik se određuje tako što se organsko jedinjenje oksidiše (spali) do krajnjih produkata CO_2 i H_2O .

Određivanje nastalog CO_2 moguće je vršiti njegovim direktnim merenjem pomoću IR spektrofotometra ili indirektno, apsorbovanjem CO_2 u rastvor, kome se meri provodljivost, odnosno redukcijom CO_2 do metana, koji se može odrediti gasno-hromatografskom analizom.

Sadržaj *TOC* otpadnih voda može se koristiti kao mera zagađenja, a u nekim slučajevima moguće je povezati vrednosti *TOC* sa *BOD* i *COD*. *TOC* test je brza metoda i može se izvršiti za samo 5 do 10 minuta. Ako je moguće uspostaviti validan odnos između rezultata dobijenih pomoću *TOC* testa i rezultata *BOD* testa, za dati uzorak otpadne vode, preporučuje se korišćenje rezultata *TOC* testa, za dobijanje brzog, a dovoljno pouzdanog rezultata.

TOC analiza je brza i reproduktivna metoda, koja se može jednostavno automatizovati, tako da ima sve veću primenu umesto metoda za merenje potrošnje kiseonika.

Broj ekvivalentnih stanovnika (*ES*)

Vrednost biološke potrošnje kiseonika, *BOD*, za oksidaciju zagađenja koje u toku dana stvori jedan stanovnik, koristi se za određivanje vrednosti poznate kao *ekvivalentni stanovnik*, *ES*. Ako jedan stanovnik u toku dana prosečno stvori biorazgradivo organsko zagađenje, za čiju oksidaciju je potrebno *m* grama *BOD*, onda se ova vrednost može usvojiti kao ekvivalentna količina potrebnog kiseonika po stanovniku na dan. Ukupno organsko zagađenje koje nosi neka otpadna voda u toku dana dobija se kao proizvod dnevnog protoka, *Q* i koncentracije njenog biorazgradivog zagađenja, *BOD*. Ako se ukupno dnevno zagađenje

otpadne vode, $Q \cdot BOD$, podeli sa količinom zagađenja koja odgovara jednom stanovniku, m , dobija se iznos broja stanovnika koji bi napravili jednaku količinu zagađenja u toku dana, kao što ga ima razmatrana otpadna voda, pa je:

$$ES = \frac{Q \cdot BOD}{m} \quad 1.5$$

ES broj ekvivalentnih stanovnika
 Q protok otpadne vode u toku dana, m^3/d
 BOD koncentracija organskog zagađenja u otpadnoj vodi, g/m^3
 m masa organskog zagađenja koje čovek stvori u toku dana, $g/st \cdot d$

Broj ekvivalentnih stanovnika, ES , je potpuno empirijski parametar i njegova osnovna namena je omogućavanje poredjenja industrijskih otpadnih voda sa otpadnim vodama iz domaćinstva (sanitarne otpadne vode) u pogledu stepena zagađenosti. Ovo je posebno značajno kod određivanja zbirnog kvaliteta otpadne vode kada se u gradsku kanalizacionu mrežu ispuštaju i industrijske otpadne vode radi zajedničkog prečišćavanja.

Otpadne vode iz domaćinstva karakteriše relativno ujednačen sastav i ona sadrži prosečno količinu biorazgradivih organskih materija za koju je prosečno potrebno oko 55 g kiseonika po stanovniku na dan, da bi se biološki oksidisala. Kada je reč o smeši sanitarnih i atmosferskih otpadnih voda ova vrednost iznosi 77 g kiseonika po stanovniku na dan. Kao neka srednja vrednost za komunalne otpadne vode, najčešće se uzima 60 g kiseonika po stanovniku na dan. Stoga se za vrednost m u jednačini 1.5 upravo i koristi ta vrednost, pa ona može da se napiše u obliku:

$$ES = \frac{Q \left[\frac{m^3}{d} \right] \cdot BOD \left[\frac{g}{m^3} \right]}{60 \left[\frac{g}{st \cdot d} \right]} \quad 1.6$$

Pored organskog zagađenja, radi procene i kvantiteta otpadne vode, za vrednost protoka otpadne vode, koja odgovara jednom ekvivalentnom stanovniku, uzima se vrednost 150 $L/st \cdot d$.

1.3.3. Biološke karakteristike otpadnih voda

Najvažnije grupe mikroorganizama koje se mogu naći u otpadnim vodama su bakterije, plesni, protozoe, mikroskopske biljke i životinje i virusi. Većina ovih mikroorganizama, posebno bakterije i protozoe su odgovorne i neophodne za biološku obradu otpadnih voda. Međutim, neke patogene bakterije, plesni, protozoe i virusi, koje se mogu naći u vodi, su nepoželjne i štetne po zdravlje.

Bakterijski indikatori

Patogeni organizmi se obično izlučuju kroz gastrointestinalni trakt ljudi u sanitarne otpadne vode. Ovi mikroorganizmi su uzročnici kolere, tifusa, paratifusne groznice, dijareje i dezenterije, kao najčešćih, vodom prenosivih bolesti. Broj patogenih mikroorganizama prisutnih u otpadnoj vodi je obično mali i njih je teško izolovati i identifikovati. Zbog toga se, kao indikatori prisustva mikroorganizama (bakterijski indikatori), koriste: ukupan broj koliformnih bakterija (TC – *total coliform*), broj fekalnih koliformnih bakterije (FC – *fecal coliform*) i broj fekalnih streptokoka (FS - *fecal streptococcus*).

Većina regulatornih agencija iz oblasti kontrole voda je uvrstila FC kao standard za kvalitet efluenta, a koji uglavnom i potiče iz fekalnih materija. Razvijeni su testovi brojanja navedenih bakterijskih indikatora i utvrđivanja njihovog tzv. najverovatnijeg broja (MPN – *most probable number*).

Mikroorganizmi

Najvažniji i najzastupljeniji mikroorganizmi koji se koriste u prečišćavanju otpadnih voda su bakterije, uglavnom gram-negativne, rodova *Pseudomonas*, *Zooglea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia* i *Mycobacterium*, kao i nitrifikacione bakterije *Nitrosomonas* i *Nitrobacter*. Pored njih, javljaju se i filamentozne bakterije rodova *Sphaerotilus*, *Thiotrix*, *Lecicothrix*, *Geotricum* i slične. Pored bakterija i druge vrste mikroorganizama imaju veoma značajnu ulogu u tretmanu (prečišćavanju) otpadnih voda, poput protozoa, koje se hrane dispergovanim (neflokulisanim) bakterijama i rotifere, koje uklanjaju male, neistaložene flokule nastalog mulja tokom procesa, pa su veoma značajne u postupcima tzv. poliranja kvaliteta efluenta nakon aerobne obrade. Kada je reč o industrijskim otpadnim vodama, značajnu ulogu mogu imati i fungi, posebno sa aspekta njihove otpornosti na kiselu sredinu, kao i male potrebe za nutrijentima.

Patogeni organizmi

Patogeni organizmi nađeni u otpadnoj vodi mogu biti izlučeni od strane ljudi ili životinja koji su zaraženi nekom bolešću ili su nosioci neke zarazne bolesti. Patogeni organizmi nađeni u otpadnoj vodi mogu se klasifikovati u četiri opšte grupe: bakterije, protozoe, crevne gliste i virusi. Bakterijski patogeni organizmi ljudskog porekla tipičan su uzrok zaraza gastroentrološskog trakta, kao i tifusne groznice, dezinterije, diareje i kolere.

1.4. Procesi, operacije, linije i sistemi za prečišćavanje otpadnih voda

U tretmanu otpadnih voda koriste se tehnološke operacije, kao i mehanički, hemijski i biološki procesi.

U operacijama prisutno zagađenje se uklanja iz vode zadržavajući prvobitan hemijski sastav, a eventualno mu se može promeniti agregatno stanje. Ovde se koriste sve vrste separacionih procesa (sita i rešetke, taložnici, flotacioni uređaji, evaporatori, apsorpcione tehnike itd.).

U procesima prisutno zagađenje trpi hemijsku promenu i to:

- hemijskim ili fizičko-hemijskim transformacijama i postupcima za prečišćavanje (najčešće razgradnja do mineralnog oblika ili prevodjenje u lako izdvojiv gasovit ili taložni čvrst oblik) i
- mikrobni metabolizmom kod biohemijskih postupaka prečišćavanja.

Linije

Linije za prečišćavanje otpadnih voda su specifičan skup pojedinačnih procesa i operacija koji omogućava uklanjanje jedne vrste zagađenja (na primer plivajućeg, lebdećeg, suspendovanog, rastvorenog, organskog i drugog...).

Sistem

Sistem za prečišćavanje otpadnih voda obuhvata više pojedinačnih linija za prečišćavanje otpadnih voda sa zadatkom da se iz otpadne vode uklone svi oblici prisutnog zagađenja, pri čemu se, pre svega, misli na tehnološku opremu, mašine i aparate koji se koriste za prečišćavanje određene otpadne vode.

° Postrojenje

Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda obuhvata primenjene sisteme, objekte i prateću infrastrukturu koja se koristi, od objekata, prilaznih puteva, zelenih površina, pa do laboratorija, tehničkih radionica i upravnih zgrada.

Da bi se oblikovao jedan sistem za prečišćavanje otpadnih voda potrebno je:

- odabrati odgovarajuće procese i operacije;
- formirati linije obrade od odabranih procesa i operacija;
- formirati sistem za obradu nizanjem linija obrade u tehnološku celinu.

Osnovni zadatak pri projektovanju postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda je pravilan izbor osnovnih procesa i operacija. Za taj izbor potrebno je raspolagati nizom podataka od kojih su najbitniji:

- podaci o karakteru otpadnih voda (vrsti, hidrauličnom i biološkom opterećenju);
- zahtevane norme za stepen prečišćene vode pre ispuštanja u recipijente;
- tehnološke norme za projektovanje;
- zakonske norme za projektovanje.

1.4.1. Vrste linija za prečišćavanje otpadnih voda

Nakon izbora osnovnih procesa i operacija pomoću kojih se može postići zahtevani stepen prečišćavanja konkretne otpadne vode, pristupa se formiranju linija za obradu. Linije se formiraju prema potrebnom stepenu obrade.

Stepeni obrade. U inženjerskoj (projektantskoj) praksi govori se o sledećim stepenima obrade otpadnih voda:

- *prvi stepen obrade (primarno prečišćavanje)* obuhvata operacije mehaničkog prečišćavanja kojim se uklanja plivajuće, lebdeće i taloživo zagađenje,
- *drugi stepen obrade (sekundarno prečišćavanje)* obuhvata procese za uklanjanje biorazgradivog zagađenja biološkim, hemijskim i/ili fizičko-hemijskim procesima, (u praksi se pojam sekundarne obrade češće upotrebljava kao sinonim za biološko prečišćavanje),
- *treći stepen (tercijerno prečišćavanje)* obuhvata procese za uklanjanje nutrijenata (azota i fosfora), biološkim ili hemijskim procesima,
- *četvrti stepen (kvaternerno prečišćavanje)* obuhvata procese i operacije za uklanjanje preostalog zagađenja (obično filtracijom i

apsorpcijom) i dezinfekciju vode ako to norme prečišćavanja zahtevaju, *sistem za obradu mulja*, služi za obradu mulja izdvojenog u prvom i drugom (ponegde i u trećem i četvrtom) stepenu prečišćavanja, a može biti u sklopu sistema za prečišćavanje otpadne vode ili se može nalaziti dislociran na nekom drugom pogodnom mestu, što je, inače, redji slučaj.

1.4.2. Sistem za prečišćavanje otpadnih voda

Obrazuje se pomoću formiranih linija za prečišćavanje, a koliko linija za prečišćavanje će on obuhvatati zavisi od karakteristika otpadnih voda i normiranog nivoa prečišćavanja.

Izbor sistema za prečišćavanje zavisi, pre svega, od zahtevanog kapaciteta, koji može biti u širokom rasponu od nekoliko stotina, nekoliko hiljada, desetina i stotina hiljada *ES*. Postrojenja do 500 stanovnika i istog broja *ES* iz industrijskih pogona su malog kapaciteta i grade se i isporučuju kao gotova sa opisom i uputstvom za rad. U zavisnosti od kapaciteta postrojenja, pojedine zemlje normiraju i kvalitet prečišćene vode, tako da što je postrojenje većeg kapaciteta, zahtevi u pogledu kvaliteta efluenta su strožiji. Kvalitet efluenta se određuje, pre svega, po sadržaju hemijske i biološke potrošnje kiseonika, kao i ukupnih suspendovanih čestica. Ukoliko postoje indicije da se u otpadnoj vodi mogu naći i neka specifična zagađenja, oni se dodatno proveravaju.

Pre pristupa projektovanju sistema za prečišćavanje otpadnih voda iz naselja i indutrije, potrebno je razmotriti potrebu prethodne obrade otpadne vode u svakom pojedinom pogonu. U tom smislu propisuju se norme zagađenosti otpadne vode za ispuštanje u javnu kanalizaciju. Uoliko se one premaše, potrebno je postaviti sistem prethodne obrade.

Prethodna obrada otpadne vode vrši se u samom pogonu. Njome se sprečava negativan uticaj industrijskih otpadnih voda, kako na postrojenje za prečišćavanje, tako i na kanalizacioni sistem. Tolerišu se povećana zagađenja biorazgradljivim supstancama u odnosu na komunalne otpadne vode ali se moraju korigovati svi parametri štetnog uticaja, a posebno toksične materije. Jedan od tih parametara je i termičko zagađenje, koje se često neopravdano zanemaruje.

Linija primarnog prečišćavanja

Ova linija obrade služi za uklanjanje „grubog“ zagađenja uz primenu odgovarajućih operacija, i to:

- teškog čvrstog materijala, pomoću peskolova;
- grubog čvrstog zagađenja pomoću rešetki i grubih sita;
- flotirajućeg organskog zagađenja u taložniku ili pomoću uređaja za flotaciju;
- taloživog organskog zagađenja gravitacionim taloženjem i finim sitima.

Ponekad se ova linija obrade deli na dva stepena:

- *preliminarni stepen obrade* kome je zadatak da zaštiti pumpe i ostalu opremu od havarija. U njemu se uklanja grubi plivajući i lebdeći materijal kao i komadni čvrsti materijal, vrše se merenja protoka (ponegde i sastava), egalizacija protoka, a ponegde i hlorisanje,
- *primarni stepen obrada* u kome se u taložniku uklanja suspendovan taloživ materijal, uz moguć dodatak hemijskih sredstava za taloženje (koagulanti, flokulanti, precipitanti), flotacija, kao i egalizacija protoka (gradnja egalizacionih bazena), ukoliko nije obuhvaćena u preliminarnom delu.

Efekti prečišćavanja otpadne vode u ovoj liniji su približno sledeći:

- do 100 % grubog i čvrstog materijala;
- bez dodatka koagulanta 50 – 70 % suspendovanog zagađenja;
- uz dodatak koagulanta 80 – 90 % suspendovanog zagađenja;
- 25 – 35 % BOD;
- 10 % fosfora;
- biološka aktivnost zanemarljiva.

Linija sekundarnog prečišćavanja

Ova linija obrade služi za uklanjanje „finog“ zagađenja koji se nalazi u obliku koloidnih ili pravih rastvora zaostalih nakon primarne linije obrade. U opštem slučaju ona može biti sastavljena od bioloških, hemijskih, fizičko-hemijskih procesa ili njihovih kombinacija. Međutim, pod sekundarnom obradom otpadne vode najčešće se podrazumeva biološka obrada.

U slučaju otpadnih voda zagađenih organskim biorazgradljivim supstancama koje su u obliku pravih rastvora (prostija organska jedinjenja organski monomeri, uključujući neorganske mikro i makronutrijente) i u obliku koloida (organski polimeri) u ovoj liniji se, u principu, mogu naći različite vrste bioloških procesa za prečišćavanje otpadnih voda, pojedinačno ili u kombinacijama.

Izbor vrste bioloških procesa koji će biti uključeni u liniju sekundarne obrade zavisi od opterećenja otpadnih voda ali i od vrste zagađenja, koje te otpadne vode sadrže:

- otpadne vode nižeg i srednjeg stepena zagađenosti, biološki lako razgradljivim zagađenjem (otpadne vode domaćinstva i dela prehrambene industrije);
- jače zagađene otpadne vode (*BOD* preko 1000 mg/L) biološki razgradljivim supstancama (industrijske otpadne vode);
- jako zagađene otpadne vode, *BOD* i preko 60000 mg/L (hemijaska i farmaceutska industrija).

Pri formiranju sekundarne linije obrade, kao poseban slučaj razmatraju se procesi kod velikih hidrauličkih opterećenja otpadnih voda sa umerenim zagađenjem. U tom slučaju, naročito u oblastima umerene klime i kada je na raspolaganju dovoljno prostora, najčešće se koriste tzv. aerobne ili fakultativne lagune, gde su procesi sporiji, ali se odvijaju u znatno većoj zapremini u odnosu na standardne postupke, pa se postiže dovoljan efekat uklanjanja zagađenja.

Efekti prečišćavanja u ovoj liniji su približno sledeći:

- više od 85 % *BOD*₅ i ukupnog suvog ostatka;
- mala efikasnost u uklanjanju makronutrienata, teških metala, biorezistentnih organskih supstanci, mikroorganizama i virusa.

Za postizanje normiranog stepena obrade ova linija, u svom produžetku mora sadržati taložnik za uklanjanje rezidualnog organskog, neorganskog i nastalog biološkog mulja, tzv. sekundarni taložnik. Istaloženi mulj u sekundarnom taložniku se, po odvođenju iz taložnika, mora obraditi u posebnoj liniji za obradu mulja.

Linija tercijarnog prečišćavanja

Ovaj stepen obrade je neophodan kod otpadnih voda zagađenim velikim količinama, makronutrijenata, azota i fosfora, nekim specifičnim

zagađenjem ili sadržajem toksičnih materija zbog kojih je bilo nemoguće primeniti sekundarnu obradu. Ove zagađujuće materije se u vodi mogu nalaziti u neorganskom ili organskom obliku.

Uklanjanje azota. Za uklanjanje organski vezanog, kao i neorganskog azota primenjuje se različiti biološki procesi ili višestepeno biološko prečišćavanje.

Uklanjanje fosfora. Velike količine fosfornih jedinjenja ne mogu se ukloniti biološkim postupcima, što je posledica tzv. zakona minimuma, koji definiše neophodan odnos sadržaja ugljenika, azota i fosfora, da bi se odvijao mikrobiološki proces ($C:N:P = 100:5:1$). Za njihovo uklanjanje koristi se taloženje hemikalijama postupkom predtaloženja, simultanog ili naknadnog taloženja.

Nakon obavljenog biološkog stepena prečišćavanja, makronutrijenti se mogu ukloniti iz vode procesom fotosinteze u aerobnim lagunama i jezerima. Pošto odnos prisutnog azota i fosfora u vodi u principu nije iznivelisan prema fiziološkim zahtevima fotosintetskih mikro i makroorganizama, u vodu se dodaje nedostajuća količina azota ili fosfora u obliku mineralnih đubriva.

Linija kvaternernog prečišćavanja

Za uklanjanje zaostalog organskog i neorganskog zagađenja u ovoj liniji se koriste postupci filtracije (najčešće peščana filtracija ali se koriste i mehanička mikro sita), taloženje uz dodatak hemijskih sredstava (obično aluminijum sulfat), apsorpcija na aktivnom uglju itd.

U cilju zaštite površinskih voda u naseljenim zonama, radi sprečavanje širenja zaraznih bolesti, prečišćena voda se dezinfikuje. Klasično sredstvo za dezinfekciju je hlor, ranije gasoviti, a danas, zbog njegovih nedostataka i prateće opasnosti, sve češće se primenjuje u obliku hipohlorita ili hlordioksida, koji se proizvode na samom postrojenju. Za sterilizaciju vode i mulja mogu se koristiti i tehnike UV zračenja. Upotreba UV sistema se u novije vreme znatno povećala u odnosu na hlorne sisteme, jer ne stvaraju štetne sporedne produkte.

Linija obrade mulja

Bez obrade mulja izdvojenog u procesima prečišćavanja otpadnih voda problem zagađenja ne bi bio u potpunosti rešen jer se njegov značajan deo nalazi u mulju koji nastaje tokom tretmana otpadne vode. Kod

komunalnih otpadnih voda i njihove biološke obrade, mulj je većim delom organskog sastava i podložan je procesima truljenja. Zbog toga se pre konačnog odlaganja on *mora stabilizovati*. Iz toga sledi da linija obrade mulja uključuje pre svega postupke stabilizacije.

Najracionalniji način rešavanja problema mulja je njegovo direktno korišćenje. Ako mulj ne sadrži biološki štetne (toksične) supstance on se može iskoristiti za đubrenje i istovremeno remedijaciju devastiranih površina, deponija šljake itd. Za korišćenje u poljopivredi postavljaju se strogi zahtevi u pogledu sadržaja teških metala, pesticida i deterdženata, kao i infektivnih mikroorganizama. Problemi infektivnosti mulja u principu se rešavaju sterilizacijom dok se problemi prisustva toksičnih supstanci mogu rešiti uz značajne ekonomske izdatke. Generalno, pri planiranju izgradnje postrojenja za tretman otpadnih voda, mora se računati na gotovo 40% investicionih troškova koji će se odnositi na obradu nastalog i izdvojenog mulja.

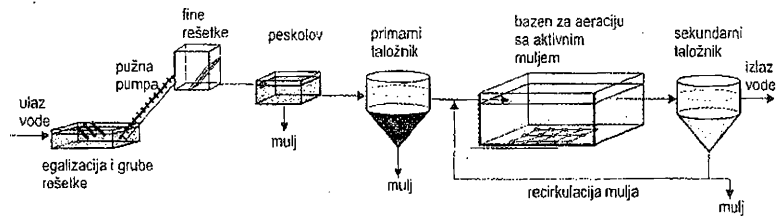
U praksi, najčešće primenjivani postupci stabilizacije mulja su:

- biološkom razgradnjom organske komponente mulja u tečnom obliku,
- biološkom razgradnjom organske komponente u suvom stanju (kompostiranje),
- odlaganjem na zemljište u cilju njegovog đubrenja,
- sušenjem ili
- spaljivanjem.

Stepen i vrsta obrade mulja zavisi od njegovog sastava i zahtevanih normativa.

1.4.3. Konvencionalni sistem za prečišćavanje otpadnih voda

U praksi se često koristi termin „*konvencionalni sistem za prečišćavanje otpadnih voda*“, pod kojim se podrazumeva opšta forma tog sistema koja ne uključuje liniju obrade mulja, slika 1.7. Osnovni konvencionalni sistem za biološko prečišćavanje otpadnih voda postavljen je još u američkom gradu Hjustonu 1916 (*Houston*) i sadržao je samo osnovnu primarnu i sekundarnu (biološku) obradu, a karakteristike obradjene vode su bile daleko ispod onih koji se danas normiraju. Sa razvojem novih procesa i operacija, linije obrade su postale složenije i efikasnije. Uvedene su i tercijarna i kvaternerna obrada, kao i obrada mulja koji nastaje u postupku obrade otpadne vode.



Slika 1.7. Konvencionalno postrojenje za tretman komunalnih otpadnih voda

Završno prečišćavanje komunalnih otpadnih voda koja se prikuplja u naseljima i industriji vrši se na gradskom postrojenju. Nakon obavljenog predtretmana otpadnih voda u industrijskim pogonima, one smanjuju stepen svog zagađenja do nivoa otpadnih voda iz naselja, pa je logično da se iz razloga racionalnosti prečišćavaju na zajedničkom postrojenju.

Prosečan sastav komunalnih otpadnih voda, koje se prečišćavaju na konvencionalnim postrojenjima je dat u tabeli 1.6.

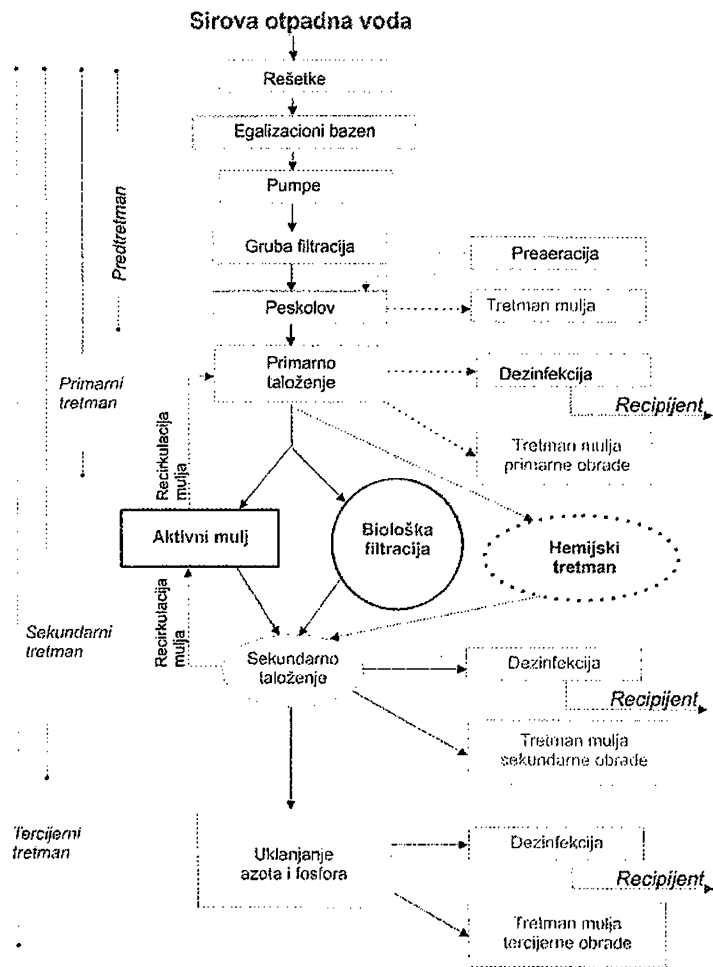
Pri sastavljanju sistema za zajedničko prečišćavanje sanitarnih (iz domaćinstava) i industrijskih otpadnih voda, norme kvaliteta prečišćene vode danas se sve više pooštravaju i postaju zakonska obaveza, pa sistemi moraju uključiti složenije linije i više linija obrade tako da ranije primenjivani *konvencionalni sistemi* danas već moraju biti doradeni u *napredne (poboljšane) sisteme*.

Tabela 1.6. Prosečan sastav komunalnih otpadnih voda

Sastojak	Koncentracija, mg/L		
	velika	srednje	slaba
Ukupni suvi ostatak	1200	720	350
Ukupni rastvoreni ostatak	850	500	250
Mineralni	525	300	145
Volatilni	325	200	105
Ukupne suspendovane materije	350	220	100
Mineralne	75	55	20
Volatilne	275	165	80
Taložljive materije, mL/L	20	10	5
<i>BOD</i> ₅	400	220	110
Ukupni organski ugljenik	290	160	80
<i>COD</i>	1000	500	250
Azot, N	85	40	20
Organski	35	15	8
NH ₄	50	25	12
NO ₂ ⁻	0	0	0
NO ₃ ⁻	0	0	0
Fosfor, P	15	8	4
Organski	5	3	1
Neorganski	10	5	3
Hloridi ^p	100	50	30
Alkalnost (kao CaCO ₃)	200	100	50
Masti i ulja	150	100	50

Tabela 1.6. Prosečan sastav komunalnih otpadnih voda

Sastojak	Koncentracija, mg/L		
	velika	srednje	slaba
Ukupni suvi ostatak	1200	720	350
Ukupni rastvoreni ostatak	850	500	250
Mineralni	525	300	145
Volatilni	325	200	105
Ukupne suspendovane materije	350	220	100
Mineralne	75	55	20
Volatilne	275	165	80
Taložljive materije, mL/L	20	10	5
<i>BOD</i> ₅	400	220	110
Ukupni organski ugljenik	290	160	80
<i>COD</i>	1000	500	250
Azot, N	85	40	20
Organski	35	15	8
NH ₄	50	25	12
NO ₂ -	0	0	0
NO ₃ -	0	0	0
Fosfor, P	15	8	4
Organski	5	3	1
Neorganski	10	5	3
Hloridi ^b	100	50	30
Alkalnost (kao CaCO ₃)	200	100	50
Masti i ulja	150	100	50



Slika 1.8. Šema unapređenog konvencionalnog sistema za tretman otpadnih voda

1.4.4. Konvencionalni sistem za stabilizaciju mulja

U sastav osnovne linije za obradu mulja ulazi:

- napojni šaht sa pumpom za mulj;
- ugušćivač mulja;
- anaerobni biološki reaktor (digestor);
- gasno postrojenje;
- taložnik za idvajanje mulja iz eflunta iz digestora;
- ugušćivanje mulja iz taložnika;
- dalja obrada mulja.

Po sastavu mulj iz digestora predstavlja veoma kvalitetno organsko đubrivo, pa ga je moguće u te svrhe i koristiti. Međutim, njegova potencijalna infektivnost nameće potrebu dezinfekcije, a potencijalno prisustvo teških metala onemogućava njegovu primenu kao organskog đubriva u poljoprivredi. Sve ovo je potrebno razmotriti, a zatim primeniti jedan od sledećih postupaka obrade:

- aerobno termofilno kondicioniranje,
- kompostiranje,
- termičko kondicioniranje,
- pasterizacija,
- radijaciona sterilizacija,
- sušenje,
- sagorevanje.

Mulj iz digestora je najracionalnije obraditi kompostiranjem, pa ga zatim koristiti kao organsko đubrivo. Zbog visoke temperature koja se postiže u kompostiranju, mulj se sterilise i sa aspekta infektivnosti njegova primena nije limitirana. Jedini ograničavajući faktor u njegovoj primeni može biti prisustvo teških metala. U tom slučaju njegova upotreba u poljoprivredi nije dozvoljena ali se može koristiti za remedijaciju devastiranog zemljišta i deponija šljake, a ukoliko i to nije moguće, mulj se onda ili odlaže na posebno izgrađenu i obezbeđenu deponiju ili spaljuje.

1.4.5. Napredne tehnike

Razvojem novih tehnika i materijala, danas se pored klasičnih postupaka tretmana otpadnih voda sve više uvode i tzv. napredne tehnike, koje primenjuju različite kombinacije pojedinih procesa. Sve ti postupci se primenjuju kada je reč o posebno velikim koncentracijama ili veoma

specifičnim zagađujućim materijama u otpadnim vodama. Tako se mogu koristiti sistemi sa imobilisanim mikroorganizama na specijalnim nosačima pri biološkoj obradi, korišćenje savremenih filtracionih postupaka ili primenom naprednih oksidacionih procesa, skraćeno *AOPs*, (*advanced oxidation processes*), koje uključuju razne kombinacije primenjenih koncentracija ozona, vodonik peroksida i *UV* zračenja. Napredni oksidacioni procesi su sve više u upotrebi kod prerade industrijskih otpadnih voda sa vrednošću *COD* od nekoliko hiljada, kao i u slučaju tretmana novih sintetizovanih proizvoda hemijske i farmaceutske industrije. Kako primena ovih postupaka, zahteva i značajne operativne troškove, to je potrebno dobro proanalizirati sve aspekte prečišćavanja određene otpadne vode, pre nego se započne projektovanje postrojenja.

PRIMARNA OBRADA OTPADNIH VODA

Primarna obrada otpadnih voda predstavlja celinu koja se odnosi na mehaničko i fizičko-hemijsko uklanjanje prisutnog zagađenja. Pre postupaka primarne obrade, primenjuju se tzv. preliminarni postupci prečišćavanja. Oni predstavljaju prvi stepen mehaničkog čišćenja i imaju pre svega, funkciju da odstrane materije iz vode koje se lako i jednostavno mogu ukloniti, poput uklanjanja grubih sastojaka (komadastih materijala), kao što su: drvo, papir, plastika, guma, lišće, smeće i drugo. Istovremeno tu se uklanjaju i teži neorganski materijali poput peska, šljunka, metalnih delova i stakla, koji mogu kasnije, a pre svega abrazijom, ugroziti pojedine delove opreme koja se koristi.

Takođe, otpadne vode iz određenih ugostiteljskih i turističkih objekata, kuhinja, menzi ili uslužnih i industrijskih pogona mogu biti sa povišenim sadržajem masti i ulja i njih je neophodno ukloniti preliminarnim tretmanom, pre nego dođu na postrojenje za prečišćavanje. Naime, masti i ulja se ne mogu biološki prečistiti u standardnim aerobnim postupcima, tako da ih je daleko jednostavnije odmah izdvojiti iz vode u uređajima koji se nazivaju odvajачi (separatori) ulja i masti, koji se ugrađuju na samim objektima gde te otpadne vode i nastaju, pa na taj način i predstavljaju deo preliminarnog tretmana otpadne vode.

Primarna obrada otpadnih voda se odnosi na primenu određenih fizičko-hemijskih postupaka prečišćavanja i završava se primarnim taloženjem. Osnovni cilj primarne obrade je da se iz vode uklone prisutni suspendovani i rastvoreni neorganski zagađivači. Najčešće se ova faza zasniva na procesu gravitacione separacije suspendovanih čestica. U slučaju prisutnih rastvorenih materija, dodatkom hemijskih sredstava one se prevode u taložne oblike. Tu se, pre svega, misli na procese koagulacije i flokulacije, neutralizacije, oksidacije i hemijske precipitacije.

Pri ovim procesima se i deo prisutnog organskog zagađenja vezuje za čestice koje se talože i zajedno sa njima uklanja iz vode. Suprotno taloženju, uvođenjem vazduha u postupku flotacije, čestice mogu biti podignute na površinu vode i tako odstranjene iz nje, što takođe predstavlja način primarne obrade otpadnih voda, jer se dominantno uklanjaju prisutne suspendovane materije.

2. MEHANIČKI TRETMAN

Mehanički tretman u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda obuhvata proticanje otpadne vode kroz kanale i cevovode, merenje protoka, ujednačavanje dotoka vode na postrojenje (egalizacija), izdvajanje grubog materijala na rešetkama i sitima, odvajanje inertnih, taložnih i filtrabilnih čestica, kao i odvajanje masti i ulja. Svi navedeni postupci u svojoj osnovi imaju primenu mehaničkih tehnoloških operacija, pa otuda i zajednički naziv za skup navedenih postupaka, mehanički tretman otpadnih voda.

Korišćenjem mehaničkih postupaka prečišćavanja otpadnih voda odstranjuju se iz zagađenih voda nerastvorne materije, kao i deo materija u koloidnom stanju. Pored odstranjivanja komadastih i drugih čvrstih materijala iz otpadne vode, ovim postupkom se odstranjuju materije iz vode koje bi ometale ili opterećivale naredne faze prečišćavanja vode, kao i rad samih uređaja.

2.1. Merenje protoka

Merenje protoka otpadne vode je osnovni preduslov za određivanje i postizanje željene efikasnosti čitavog sistema za prečišćavanje otpadne vode, kao i blagovremenog reagovanja, kontrole i regulacije rada određenog postrojenja.

Danas je najčešće u upotrebi moderna oprema, koja se zasniva na korišćenju elektronskih senzora i pretvarača, koji daju električni signal, koji se dalje može obrađivati na željeni način, ali se takođe, obično paralelno sa njima, koriste i klasični sistemi koji daju pouzdani odgovor o redu veličine određenog protoka otpadne vode. Takođe, primena savremenih elektronskih uređaja u svojoj osnovi ima merenje veličina koje se dobijaju klasičnim tehnikama merenja, poput određivanja visine nivoa i slično, pa će se u ovom delu posebno obraditi merenje protoka u otvorenim kanalima, kao najpouzdanije metode merenja.

Ovakva merenja se zasnivaju na činjenici da će se u profilisanom obliku kanala, poput trouglastog, pravouganog ili trapeznog, nivo vode menjati u skladu sa protokom kroz kanal. Izvođenjem eksperimentalnih merenja ili proračunom, moguće je dobiti funkcionalnu zavisnost protoka od dubine vode i na taj način doći do mogućnosti da se merenjem dubine vode u kanalu odredi njen protok.

Stoga se rešavanje problema svodi na određivanje visine vode u kanalima, hidrauličkog radijusa, odnosno protoka i brzine proticanja vode kroz otvorene kanale, kao i na određivanje geometrije različitih oblika otvorenih kanala.

U ovakvim sistemima nema nadpritiska, tj, proticanje otpadne vode se odvija na atmosferskom pritisku i kroz njih se voda transportuje gravitacionom energijom.

Za merenje protoka odnosno brzine proticanja otpadne vode u otvorenim kanalima najčešće se primenjuje Maningova (*Manning*) jednačina, jednačina 2.1:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 2.1$$

na osnovu koje se može izračunati protok vode po jednačini 2.2.

$$Q = A \cdot V \quad 2.2$$

- V srednja brzina, m/s
 n Maningov koeficijent hrapavosti, $s/m^{1/3}$
 R hidraulički prečnik, m
 S nagib kanala
 Q protok otpadne vode, m^3/s
 A površina poprečnog preseka ispunjenog vodom, m^2

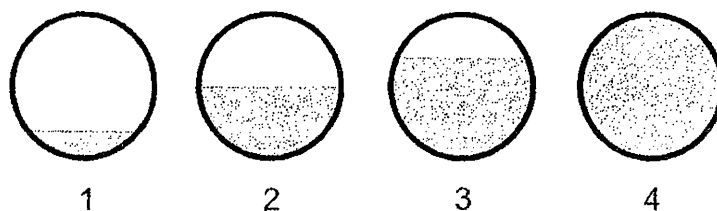
Maningov koeficijent hrapavosti zavisi od vrste materijala od kojih su cevi napravljene, a za neke materijale te vrednosti su date u tabeli 2.1:

Tabela 2.1. Vrednosti Maningovog koeficijenta hrapavosti

Tip cevi	Maningov koeficijent, n
Betonski otvoren kanal	0,013 – 0,022
Betonska cev	0,010 – 0,015
Plastična cev	0,011 – 0,015
Čelična cev	0,011

Proticanje otpadne vode u cevima (kružnim kanalima) se posmatra kroz četiri različita slučaja, slika 2.1:

- 1) kada voda ispunjava manje od polovine poprečnog preseka cevi;
- 2) kada voda ispunjava tačno polovinu poprečnog preseka cevi;
- 3) kada voda ispunjava više od polovine poprečnog preseka cevi;
- 4) kada voda ispunjava pun poprečni presek cevi.



Slika 2.1. Tipovi proticanja vode kroz kružne kanale

Kod primene Maningove jednačine, osnovni problem se svodi na izračunavanje hidrauličkog radijusa, R , koji predstavlja odnos površine

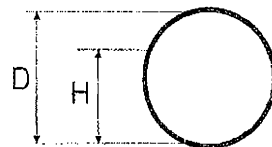
poprečnog preseka ispunjenog vodom, A , i okvašenog obima, O , jednačina 2.3.

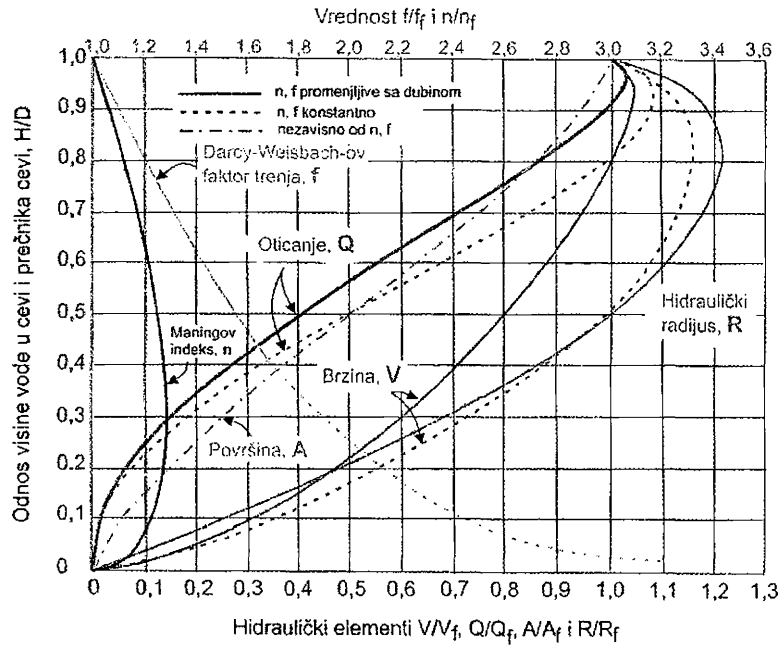
$$R = \frac{A}{O} \quad 2.3$$

Za slučaj 1 na slici 2.1, koriste se jednačine, u kojima su korišćene veličine prikazane na šemi:

$l = 2\sqrt{r^2 - d^2} = 2r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ $= 2d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$ $d = \frac{1}{2}\sqrt{4r^2 - l^2} = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}$ $\theta = \frac{O}{r} = 2 \frac{1}{\cos \frac{d}{r}} = 2 \frac{1}{\sin \frac{l}{D}}$ $O = r \cdot \theta = \frac{1}{2} D \theta$ $A = \frac{r^2}{\cos \frac{r-H}{r}} - (r-H) \cdot \sqrt{2rH - H^2}$	
---	--

Za slučaj 3 na slici 2.1., koristi se prikazani dijagram, slika 2.2., gde veličine bez indeksa f predstavljaju stvarne vrednosti za posmatrani slučaj, dok vrednosti sa indeksom f predstavljaju vrednosti pri proticanju kroz pun poprečni presek.





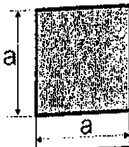
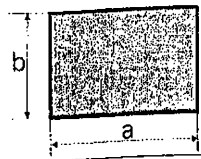
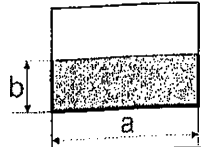
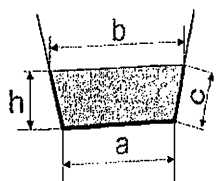
Slika 2.2. Hidraulički odnosi $\frac{V}{V_f}, \frac{Q}{Q_f}, \frac{A}{A_f}, \frac{R}{R_f}$ u zavisnosti od odnosa $\frac{H}{D}$, za kružne kanalizacione kanale

Za slučajeve 2 i 4 na slici 2.1., izračunavanje hidrauličkog radijusa se svodi na primenu jednačina, prikazanih u šemi:

$R = \frac{A}{O} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{2}}{D\pi \cdot \frac{1}{2}} = \frac{D}{4}$	
$R = \frac{A}{O} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4}}{D\pi} = \frac{D}{4}$	

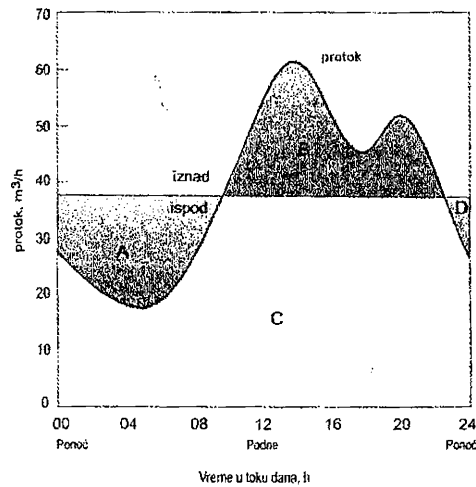
dok su za druge profile cevi jednačine date u tabeli 2.2:

Tabela 2.2. Izračunavanje hidrauličkog radijusa kanala

Oblik kanala	Površina, A	Okvašeni obim, O	Hidraulički radijus, $R = \frac{A}{O}$
	a^2	$4a$	$\frac{a}{4}$
	$a \cdot b$	$2(a + b)$	$\frac{a \cdot b}{2(a + b)}$
	$a \cdot b$	$2b + a$	$\frac{a \cdot b}{2b + a}$
	$\frac{a + b}{2} \cdot h$	$a + 2c$	$\frac{(a + b) \cdot h}{2(a + 2c)}$

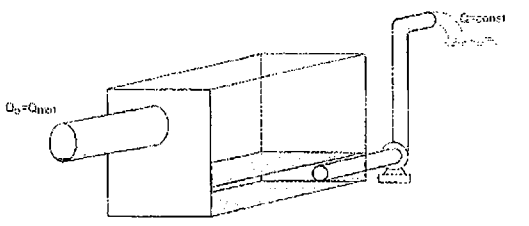
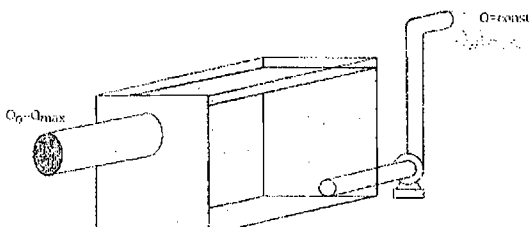
2.2. Egalizacija

Projektovanje sistema za tretman otpadne vode, vrši se u relativno uskom opsegu protoka vode, kako bi se proces odvijao što efikasnije. S toga velike oscilacije u dotoku otpadne vode, u toku određenog perioda, od sata, preko dana, meseca pa do godišnjeg doba, mogu prouzrokovati veoma loš rad sistema i čak dovesti do potpunog ugrožavanja njegovog funkcionisanja. Prevazilaženje ovog problema vrši se tako što se u samom postrojenju predviđa potrebna zapremina bazena za prihvatanje hidrauličkih udara i protoka vode u periodu maksimalnog opterećenja, kako bi se iz njih upućivala samo ona količina otpadne vode koja se nalazi u projektovanom opsegu protoka, koji neće ugroziti rad postrojenja. Na taj način, vrši se ujednačenje protoka odnosno, egalizacija. Pored ujednačavanja protoka, na ovaj način se vrši i ujednačavanje kvaliteta otpadne vode koja se prečišćava. Sam postupak ujednačavanja protoka i kvaliteta otpadne vode naziva se egalizacija i predstavlja tehnološku operaciju kojom se ujednačavaju ekstremne vrednosti, kako maksimalne tako i minimalne promene protoka i količine zagađenja u otpadnoj vodi, najčešće tokom jednog dana, u toku 24 časa. Za projektovanje egalizacionog bazena potrebno je u dužem vremenskom periodu prikupiti podatke o časovnim i dnevnim promenama protoka i količine zagađujućih materija u otpadnoj vodi, kao što je pokazano na slici 2.3,



Slika 2.3. Promena protoka otpadne vode u toku dana

U zonama *A* i *D* dotok je manji, a u zoni *B* je veći od srednjeg protoka ka postrojenju, dok zona *C* obezbeđuje onu količinu vode potrebnu za odvođenje na postrojenje.

	<p>Minimalni dotok otpadne vode na postrojenje, naročito tokom noćnih časova</p>
	<p>Maksimalni dotok otpadne vode na postrojenje, u jutarnjim i poslepodnevnim „špicevima“</p>

U oba navedena slučaja egalizacioni bazen mora obezbediti konstantan protok ka ostalim uređajima na postrojenju.

Projektovanje egalizacionog bazena se vrši u dva pravca, pri čemu se prvo razmatra ujednačavanje protoka, a potom i ujednačavanje organskog zagađenja (*BOD*) u otpadnoj vodi. Rešavanje projektnog problema se svodi na izračunavanje potrebne zapremine egalizacionog bazena, na osnovu vrednosti maksimalne, minimalne i srednje vrednosti protoka koji dolazi ka postrojenju.

2.3. Rešetke

Za uklanjanje grubog i krupnog materijala koriste se rešetke koje se obično sastoje od paralelnih šipki ili štapova koji su uglavljeni u metalni ram, slika 2.4.

Polazeći od Bernulijeve jednačine, pad pritiska može se odrediti pri proticanju otpadne vode kroz rešetke:

$$h = \frac{V^2 - v^2}{2gC^2} \quad 2.4$$

- h pad pritiska, m
- V brzina proticanja vode između rešetki, m/s
- v brzina vode u dovodnom kanalu, pre prolaska kroz rešetku, m/s
- g ubrzanje zemljine teže, $9,81 m/s^2$
- C koeficijent isticanja vode kroz rešetke, bezdimenziona veličina sa tipičnom vrednošću 0,84

Zamenom vrednosti za kvadrat koeficijenta isticanja, $C^2 = 0,7$ u jednačinu 2.4, pad pritiska se može izračunati pomoću izraza:

$$h = \frac{1}{0,7} \left(\frac{V^2 - v^2}{2g} \right) \quad 2.5$$

Veoma često korišćenu jednačinu za izračunavanje pada pritiska na rešetki je predložio Kiršmer (Kirschmer), jednačina 2.6, a ona važi samo za potpuno čistu rešetku kada je pad pritiska najmanji, pošto je jasno da pad pritiska raste sa porastom zapušenosti rešetke:

$$h = B \left(\frac{w}{b} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{v^2}{2g} \sin \theta \quad 2.6$$

- h ukupni pad pritiska, m
- B faktor oblika šipki, (dat u Tabeli 2.3)
- w maksimalna širina šipke upravno na pravac proticanja, m
- b minimalni prazan prostor između šipki, m
- v brzina vode u dovodnom kanalu, pre prolaska kroz rešetku, m/s

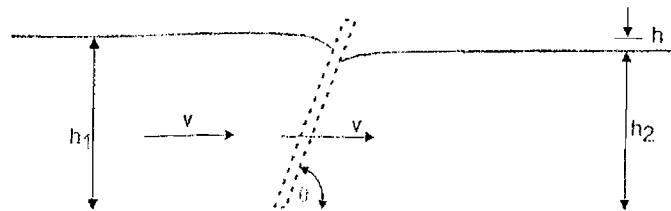
g ubrzanje zemljine teže, $9,81 \text{ m/s}^2$

θ ugao pod kojim je rešetka postavljena u odnosu na horizontalu

Tabela 2.3. Vrednosti faktora oblika šipki B

Tip rešetke	B
Pravougaoni profil oštih ivica	2,42
Pravougaoni profil sa polukružnom prednjom stranom	1,83
Kružni profil	1,79
Pravougaoni profil sa polukružnom prednjom i zadnjom stranom	1,67
Oblik suze	0,76

poprečni presek šipki na rešetkama



Slika 2.4. Grube rešetke

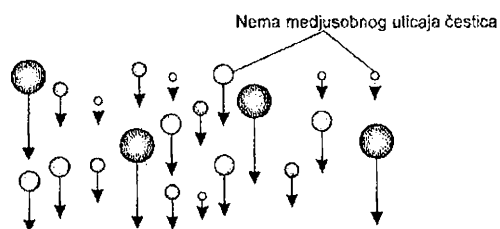
2.4. Taloženje

U tehnologiji obrade otpadnih voda najstariji i najšire primenjavani postupak je taloženje. Za razliku od izdvajanja inertnih materijala, termin taloženje se primenjuje za izdvajanje i neorganskog i organskog sastava iz otpadnih voda. Takođe, nakon biološke obrade, taložnici se koriste za odvajanje novonastalog organskog mulja od prečišćena vode.

Prema načinu taloženja čestica u otpadnoj vodi, razlikuju se četiri tipa taloženja: diskretno (slobodno), agregatno, zonalno i stešnjeno taloženje.

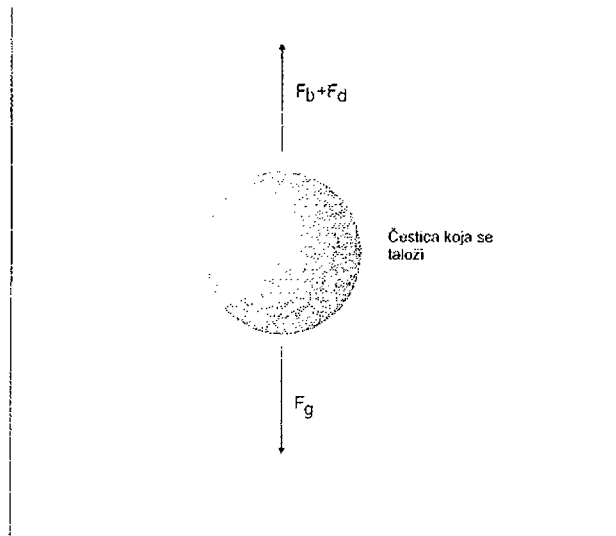
Kada se čestice talože u vodi, a da među njima nema međusobnog dodira, niti nekog drugog uticaja, onda se one pojedinačno talože, shodno njihovim taložnim karakteristikama, a taloženje se naziva diskretno ili slobodno, slika 2.5.

Tip 1 Diskretno taloženje



Slika 2.5. Šema slobodnog ili diskretnog (pojedinačnog) taloženja

Sile koje, pri diskretnom taloženju, deluju na česticu tokom taloženja u vodi prikazane su na slici 2.6.



Slika 2.6. Bilans sila koje deluju na česticu

Bilans sila koje deluju na česticu pri kretanju kroz fluid naniže, može se matematički predstaviti sledećom jednačinom:

$$\frac{d(m_p V_s)}{dt} = \sum F = F_g - F_b - F_d = \rho_p V_p g - \rho V_p g - C_d \rho A_p \frac{V_s^2}{2} \quad 2.7$$

m_p masa čestica

V_s brzina taloženja u bilo kom vremenu t , m/s

t vreme, s

F_g sila gravitacije, N

F_b sila potiska, N

F_d sila trenja između čestice i vode, N

ρ_p gustina čestica, kg/m^3

V_p zapremina čestica, m^3

g ubrzanje zemljine teže, m/s^2

ρ gustina vode (ili bilo kog drugog fluida), kg/m^3

C_D koeficijent trenja, bezdimenziona veličina

A_p projektovana površina čestice u pravcu taloženja čestica, m^2

Koeficijent C_D nije konstantan i zavisi od Reynoldsovog broja i oblika čestice :

$$Re < 1 \quad C_D = \frac{24}{Re} = 24\mu/\rho d v \quad 2.8$$

$$1 < Re < 1000 \quad C_D = 18.5/Re^{0.5} \quad 2.9$$

$$Re > 1000 \quad C_D = 0,34 + 0,4 \quad 2.10$$

Sila trenja izađu čestice i vode, F_d , se može definisati jednačinom:

$$F_d = C_D A_p \rho \frac{V_s^2}{2} = \frac{24\mu}{\rho d_p V_s} \cdot \frac{\rho \pi d_p^2 V_s^2}{4 \cdot 2} = 3\pi\mu d_p V_s \quad 2.11$$

pa je sada bilans sila, dat jednačinom 2.7, jednak:

$$m_p \frac{dV_s}{dt} = \rho_p V_p g - \rho V_p g - 3\pi\mu d_p V_s \quad 2.12$$

Zapremina sferne čestice izračunava se po jednačini:

$$V_p = \frac{\pi}{6} d^3 \quad 2.13$$

odakle se, za stacionarne uslove, pri kojima važi $dV_s/dt = 0$, iz bilansa 2.12, dobija vrednost brzine V_s :

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} \quad 2.14$$

Ova jednačina reprezentuje Stoksov (Stokes) zakon.

U uslovima taloženja čestica u nelaminarnim uslovima, tj. kada se faktor trenja mora uračunavati, pri stacionarnom stanju, kada se čestica taloži konstantnom brzinom, na osnovu bilansa sila, jednačina 2.7, može se izračunati brzina taloženja pojedinačne (diskretne) čestice, koja je poznata i kao Njutnova (Newton) brzina taloženja:

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)d}{3C_D\rho}} \quad 2.15$$

- V_s brzina taloženja pojedinačne čestice, m/s
- g ubrzanje zemljine teže, m/s^2
- ρ_p gustina čestice, kg/m^3
- ρ gustina fluida, kg/m^3
- d prečnik čestice, m
- C_D bezdimenzioni koeficijent trenja

Kao što se iz jednačina 2.14 i 2.15 može zaključiti, na izračunavanje brzine taloženja čestice utiču karakteristike same čestice i medija u kome se ona taloži ali ne i brzina samog medija, u ovom slučaju vode. Taložnja čestica predstavlja vertikalnu komponentu, dok kretanje vode može biti u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Pri kretanju vode u vertikalnom pravcu ono može biti istostrujno kao i čestice, naniže ili suprotnostrujno u odnosu na česticu, naviše. Kod taloženja čestica u taložniku, voda se kreće u horizontalnom pravcu, pa rezultanta sila koje deluju na česticu pokazuje da li će na određenom vertikalnom i istovremenom horizontalnom putu doći do njenog taloženja.

Čak i u slučaju kada do taloženja čestica dođe, horizontalna brzina vode može biti toliko velika da dođe do odnošenja već istaložene čestice. Ova brzina se naziva brzina odnošenja i jednaka je brzini fluida u_h u horizontalnom smeru, a izračunava se po jednačini:

$$u_h = \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) gd}{f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.16$$

- u_h horizontalna brzina vode, m/s
- β konstanta zavisna od tipa nataloženog materijala; $\beta = 0,04$ za granulirani materijal, $\beta = 0,06$ za slepljen muljevit materijal
- g ubrzanje zemljine teže, m/s^2
- ρ_p gustina čestice, kg/m^3
- ρ gustina fluida, kg/m^3
- d prečnik čestice, m
- f Darsi-Vajzbahov (*Darcy-Weisbach*) faktor trenja, 0,02 – 0,03

Napomena: u prethodnoj jednačini često se odnos ρ_p/ρ naziva i specifična gustina i za potrebe projektovanja daje se kao vrednost u bezdimenzionom obliku.

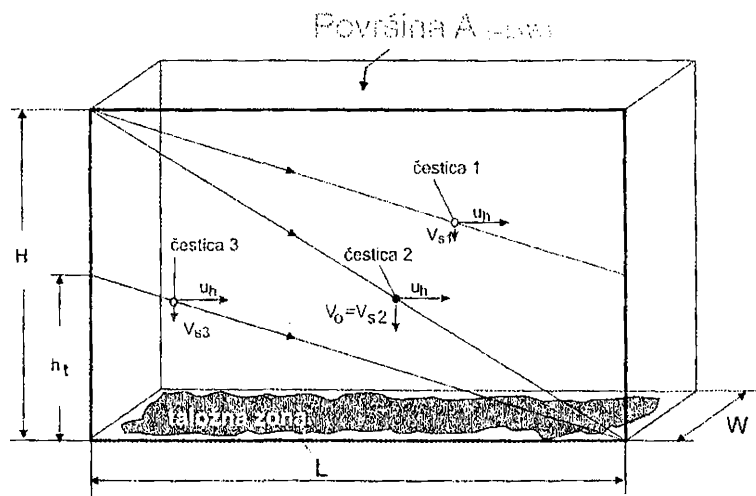
Da li će do taloženja doći ili ne zavisi od odnosa brzine kojom se voda kreće kroz taložnik i vrednosti brzine odnošenja, pa je:

$u < u_f$ omogućeno je taloženje čestica

$u \geq u_f$ dolazi do odnošenja čestica

Najčešće korišćeni taložnici su pravougaonog, kvadratnog i kružnog poprečnog preseka.

Taloženje čestica u pravougaonom taložniku



Slika 2.7. Šema taloženja čestica u pravougaonom taložniku

Tri čestice prikazane na slici 2.7., imaju različite brzine taloženja i da li će se istaložiti ili ne zavisi od visine na kojoj uđu u taložnik.

Ako se sa u_0 obeleži zapreminski protok vode po jedinici površine taložnika, onda je:

$$u_0 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{WL} = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} \quad 2.17$$

u_0 zapreminski protok po jedinici površine taložnika (vertikalna brzina vode), $m^3/m^2 \cdot s$

Q zapreminski protok otpadne vode, m^3/s

A površina dna taložnika, m^2

W širina taložnika, m

L dužina taložnika, m

Horizontalna brzina kretanja vode kroz taložnik je:

$$u = \frac{Q}{H \cdot W} \quad 2.18$$

$$t = \frac{L}{u} = \frac{V}{Q} = \frac{H \cdot L \cdot W}{Q} \quad 2.19$$

H dubina zone taloženja, m

L dužina zone taloženja, m

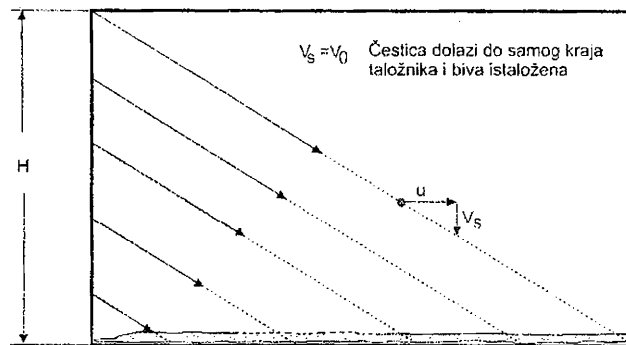
W širina zone taloženja, m

Q zapreminski protok, m^3/s

u brzina fluida, m/s

t vreme zadržavanja, min, h

Kritična brzina taloženja, V_0 , slika 2.8, računa se po jednačini:



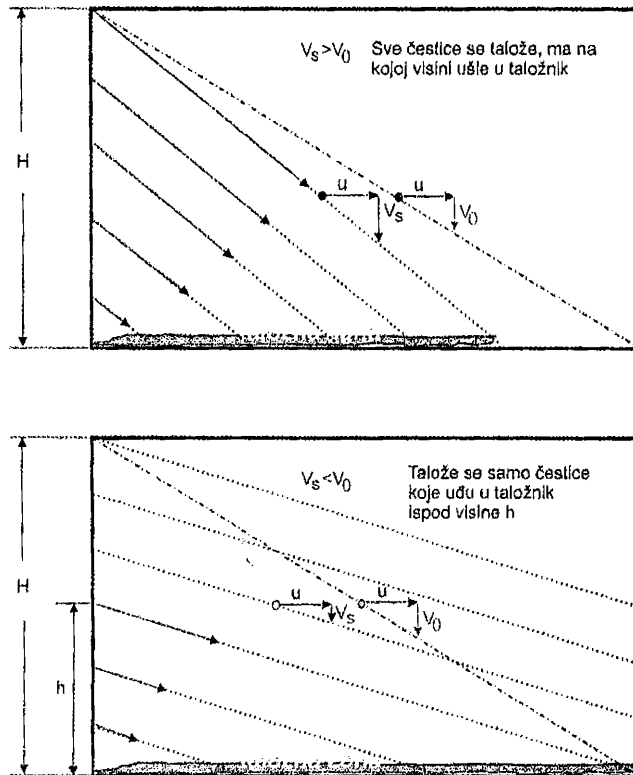
Slika 2.8. Određivanje kritične brzine taloženja

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{H \cdot u}{L} \quad 2.20$$

$$V_0 = \frac{H}{L} \cdot \frac{Q}{W \cdot H} = \frac{Q}{L \cdot W} = \frac{Q}{A} \quad 2.21$$

Ako se čestica taloži brzinom V_s , tada je visina h sa koje se taloži dužinom taložnika, slika 2.9, jednaka:

$$h = V_s \cdot t = V_s \cdot L / u \quad 2.22$$



Slika 2.9. Taloženje diskretnih čestica

Efikasnost taloženja:

Za čestice koje imaju brzinu taloženja $V_s \geq V_0$ efikasnost taloženja je 100 %.

Za čestice koje imaju brzinu taloženja $V_s < V_0$ udeo čestica sa brzinom V_s koje će biti istaložene, η , može se odrediti primenom jednačine:

$$\eta_\eta = \frac{h}{H} = \frac{V_s \cdot L}{u \cdot H} = \frac{V_s}{V_0} \quad (\eta < 1) \quad 2.23$$

To znači da će i čestice sa manjom brzinom taloženja od V_0 biti istaložene ukoliko u taložnik uđu na manjoj visini od H .

Za dati taložnik u kome se voda kreće protokom Q , samo će čestice sa većom ili jednakom brzinom taloženja od V_0 biti kompletno uklonjene iz vodene struje. Ako y_0 reprezentuje udeo čestica sa brzinom manjom od V_0 , onda će stepen uklanjanja čestica iz vode biti $1 - y_0$.

Takođe, sve čestice sa manjom brzinom taloženja od V_0 će se proporcionalno odnosu V_s/V_0 odvajati iz vode.

Kada se uzmu u obzir različite veličine čestica, procenat izdvajanja se može izraziti kao:

$$x = \int_0^{y_0} \frac{V_s}{V_0} dy \quad 2.24$$

Ukupan udeo izdvojenih čestica, F , biće:

$$F = (1 - y_0) + \frac{1}{V_0} \int_0^{y_0} V_s dy \quad 2.25$$

ili približno:

$$F = 1 - y_0 + \frac{V_0 + V_{s1}}{2V_0} (y_0 - y_1) + \frac{V_{s1} + V_{s2}}{2V_0} (y_1 - y_2) + \dots \\ + \frac{V_{si} + V_{si+1}}{2V_0} (y_i - y_{i+1}) \quad 2.26$$

odnosno:

$$F = 1 - y_0 + \frac{1}{V_0} \sum V_s \Delta y \quad 2.27$$

y_0 udeo čestica sa $V_s < V_0$

i i-ta čestica

Taloženje čestica u peskolovu

Inertni materijal u otpadnoj vodi čine otpadne materije koje su biorezistentne, odnosno materije koje nisu podložne mikrobiološkoj razgradnji i koje u postupcima biološke obrade neće biti transformisane. Čestice inertnog materijala, imaju relativno veliku gustinu, pa su im brzine taloženja veće od čestica organskih, biorazgradljivih materijala, iako nakon prolaska kroz rešetke, sita, eventualno homogenizator i egalizacioni bazen, mogu biti jednake veličine. Inertni materijali se uglavnom sastoje od izolovanih čestica, a ne od njihovih agregata. Pod inertnim materijalom u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda, podrazumevaju se biorezistentne organske materije, kao što su ljuske jajeta, ljuske i koštice voća, komadići kostiju, ali i čestice peska, šljunka, šljake i drugi.

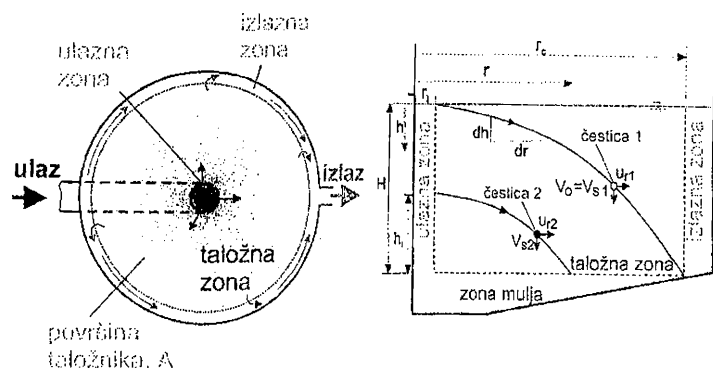
Neke uobičajne karakteristike peskolova su:

- brzina kretanja vode u peskolovu je obično 0,3 m/s,
- vreme zadržavanja vode u peskolovu je oko 60 s,
- odnos dubine prema dužini bazena se kreće od 1: 20 do 1: 0,5,
- dužina taložnika se kreće do 30 m, a obično je 10 – 15 m

Pored inertnih materijala u otpadnoj vodi mogu biti prisutne i veće biorazgradive čestice, međutim, u peskolovima nije poželjno njihovo uklanjanje. Razlog za to je u činjenici da dobijeni talog u peskolovu kao inertan materijal može biti lako deponovan, bez opasnosti od organskog i biološkog zagađenja. Preostali deo inertnih materija se uklanja u taložnicima, zajedno sa određenim delom prisutnog biorazgradivog organskog zagađenja.

Taloženje čestica u kružnom taložniku

Mehanizam taloženja u kružnim taložnicima je po istom principu taloženja kao i kod pravougljih taložnika i koriste se iste jednačine koje definišu vrednost kritične brzine taloženja i efikasnosti taloženja, slika 2.10.



Slika 2.10. Šema taloženja čestica u kružnom taložniku

Krećući se od centra prema periferiji taložnika, fluid menja svoju brzinu shodno jednačini:

$$u_h = \frac{Q}{2\pi r H} \quad 2.28$$

- u_h brzina fluida (vode), m/s
- Q zapreminski protok fluida, m^3/s
- H debljina taložne zone, m
- r rastojanje mereno od centra taložnika, m
- r_i poluprečnik ulazne centralne cevi (zone) u taložnik, m
- r_c poluprečnik ivice kružnog taložnika, m

Trajektorija čestice 1 na slici 2.10, koja polazi sa vrha taložnika i dospeva na sam kraj taložnika, pokazuje vrednosti kritične brzine čestice koja će biti istaložena tokom prolaska fluida kroz taložnik.

Odnos promene dubine na kojoj će se naći čestica sa promenom poluprečnika duž taložnika je jednak odnosu:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{V_0}{u_h} \quad 2.29$$

Zamenom vrednosti za horizontalnu brzinu vode u taložniku u jednačinu 2.29, dobija se:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{V_0}{\frac{Q}{2\pi rH}} = \frac{2\pi rHV_0}{Q} \quad 2.30$$

Preuređenjem i integraljenjem jednačine 2.30, u granicama geometrije sistema:

$$\int_0^H dh = \frac{2\pi HV_0}{Q} \int_{r_i}^{r_c} r dr \quad 2.31$$

dobija se:

$$H = \frac{2\pi HV_0}{Q} \left[\frac{r^2}{2} \right]_{r_i}^{r_c} \quad 2.32$$

odnosno:

$$H = \frac{2\pi HV_0}{Q} (r_c^2 - r_i^2) = \frac{HA}{Q} V_0 \quad 2.33$$

odakle se nakon skraćivanja i preuređenja dobija jednačina:

$$V_0 = \frac{Q}{A} \quad 2.34$$

V_0 brzina taloženja čestice koja će se istaložiti u taložniku, m/min

Q protok otpadne vode kroz taložnik, m^3/min

A površina ogledala vode u kružnom taložniku, m^2

Istovremeno, ako se poznaje vrednost kritične brzine taloženja određene čestice, može se izračunati na kom rastojanju će ona biti istaložena u kružnom taložniku, na osnovu jednačine:

$$H = t \cdot V_0 = \frac{\pi(r^2 - r_i^2)H}{Q} \cdot V_0 \quad 2.35$$

H rastojanje čestice od površine vode u taložniku, m

t vreme taloženja, h

V_0 kritična brzina taloženja čestica, m/h

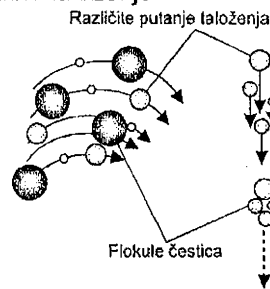
Saglasno ovome, trajektorija diskretnih čestica u kružnom taložniku ima paraboličan oblik.

Kao što se vidi, vrednost kritične brzine taloženja kod kružnog taložnika, identično se izračunava kao i kod pravougaonog taloženja, s tim što se mora voditi računa o izračunavanju vrednosti površine taložnika.

2.4.1 Agregatno taloženje

Pri bistrenju vode najčešće dolazi do koalescencije diskretnih čestica i formiranja agregata i taloženje se vrši prema tipu 2, slika 2.11. Takođe, veoma često primenjivan postupak koagulacije i flokulacije, koji rezultuje formiranjem flokula različite veličine i brzine taloženja, završava se njihovim izdvajanjem iz otpadne vode postupkom taloženja, pa se ovaj tip taloženja naziva i flokulaciono taloženje. Stoga je veoma bitno poznavati mehanizam i način određivanja neophodnih projektnih parametara.

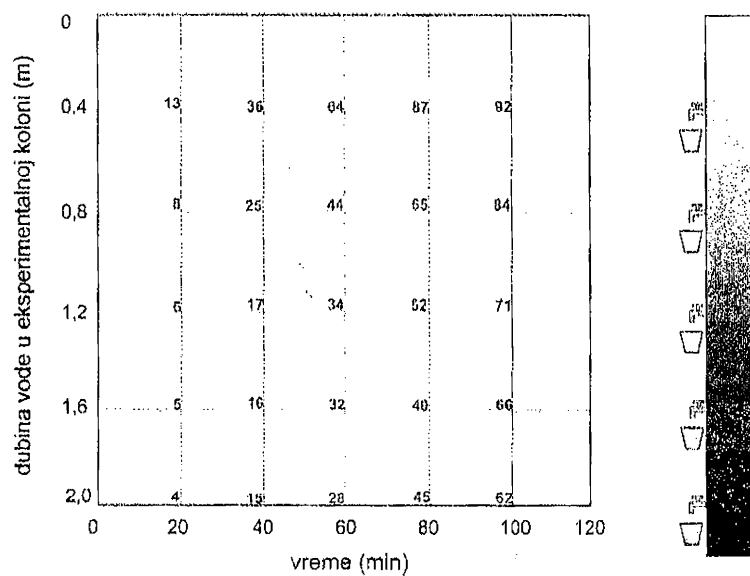
Tip 2 Agregatno taloženje



Slika 2.11. Agregatno taloženje

Najvažnije je znati da je za određivanje efikasnosti taloženja u ovom slučaju, neophodno uraditi test u odgovarajućem eksperimentalnom taložniku koji bi trebao da ima dubinu jednaku dubini vode u taložniku i da se sa vremenom prati proces taloženja. Eksperimentalna aparatura je jednostavna i može biti instalirana u laboratoriji pri svakom postrojenju za tretman otpadnih voda, slika 2.12.

U laboratorijskim uslovima obično se radi sa taložnicima nešto dubljim od 2 m i prečnikom 10 – 20 cm, sa otvorima i slavinama postavljenim u približno jednakom razmaku na određenim dubinama, (obično na 0,4 – 0,5m). Pre početka taloženja odredi se sadržaj suspendovanih materija (TSS_0), kao početna vrednost. Tokom taloženja određeni aglomerati ili flokule koje mogu biti obrazovane u otpadnoj vodi počinju da se talože, različitim brzinama i po dubini taložnika se može i vizuelno uočiti pojava segregacije čestica i formiranje više segmenata koji imaju različitu koncentraciju čestica, kako se sloj vode bistri od vrha ka dnu. U određenom trenutku nakon početka taloženja, obično nakon 20 min, sa svih slavina duž taložne kolone, uzmu se uzorci i odredi sadržaj suspendovanih čestica (TSS_{t1}) u svakom uzorku posebno.



Slika 2.12. Vrednosti udela istaloženih čestica u eksperimentalnom taložniku

Sa aspekta praktične primene, interesantna je vrednost udela čestica koji se istaložio u odnosu na početnu koncentraciju suspendovanih čestica, tokom tog vremenskog intervala. Ovaj udeo istaloženih čestica se izračunava iz razlike početne i trenutne koncentracije suspendovanih čestica na određenoj dubini kolone i obično se izražava u procentima:

$$R = \frac{TSS_0 - TSS_{t=20min}}{TSS_0} \cdot 100 \quad 2.36$$

Za svaku visinu sa koje se uzima uzorak u dijagram vreme taloženja-dubina taložnika, unesu se vrednosti udela istaloženih čestica, za definisano vreme t_1 , a onda se sve ponovi za određeni vremenski interval, sve do isteka ispitivanja, čime se dobije mreža diskretnih podataka. Najčešće se uzimaju vremenski intervali od 20 min i ceo proces traje, obično do $2h$.

Jasno je da će vrednosti unete u dijagram zavisiti od tipa otpadne vode, koncentracije i vrste čestica koje se u njoj nalaze, kao i od fizičko-hemijskih parametara vode, pa je neophodno da se za svaku otpadnu vodu uradi probni test kako bi se došlo do što približnijih pokazatelja na koji način će se taloženje obaviti.

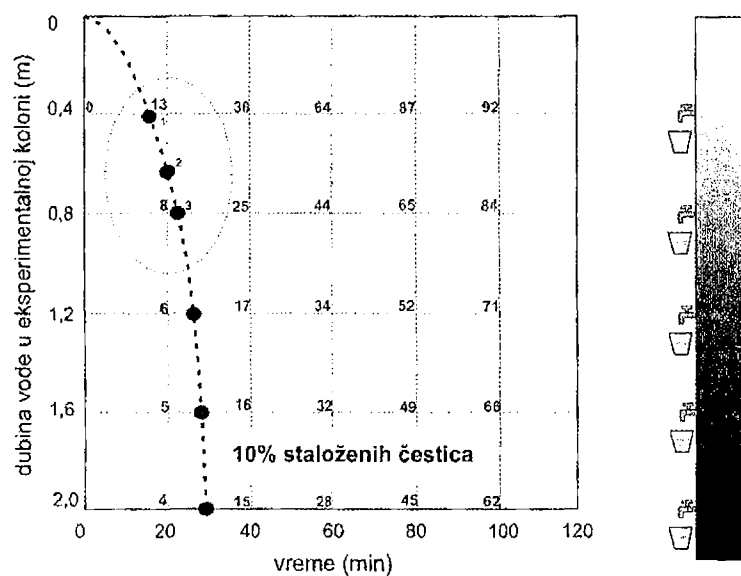
Osnovna inženjerska pitanja u ovom slučaju su: koliko je vremena potrebno da se istaloži određena količina čestica iz otpadne vode ili koja će se količina čestica istaložiti za neko definisano vreme?

Uvidom u brojke na dijagramu, očito je da one pružaju neku informaciju, ali je potrebno napraviti malo jasniju sliku o ponašanju taložnih čestica u konkretnom slučaju. Generalno, može se odabrati bilo koja procentualna vrednost, ali radi jasnoće, lakše je baratati sa zaokruženim vrednostima, pa je u ovom slučaju interesantno pogledati, na primer, kako se duž kolone sa vremenom i po visini taloži 10 % prisutnih čestica, slika 2.13. Sa dijagrama se može videti da će se vrednost 10 % istaloženih čestica na visini od $0,4 \text{ m}$, od vrha kolone dogoditi nešto pre 20 min i interpolacijom intervala od 0 do 13, može se odrediti tačka na toj visini koja odgovara uklanjanju tih 10 % čestica, tačka 1. Na isti način se između tačaka koje odgovaraju vrednostima na $0,4$ i $0,8 \text{ m}$ u 20 minutu taloženja, može odrediti vrednost na kojoj će se dubini istaložiti 10 % čestica i ta tačka se dobija iterpolacijom vrednosti između 13 i 8, tačka 2, kao i vrednost na dubini od $0,8 \text{ m}$ između 20 i 40 min , tačka 3.

U tu svrhu se može koristiti jednačina za interpolaciju vrednosti funkcija između dve tačke:

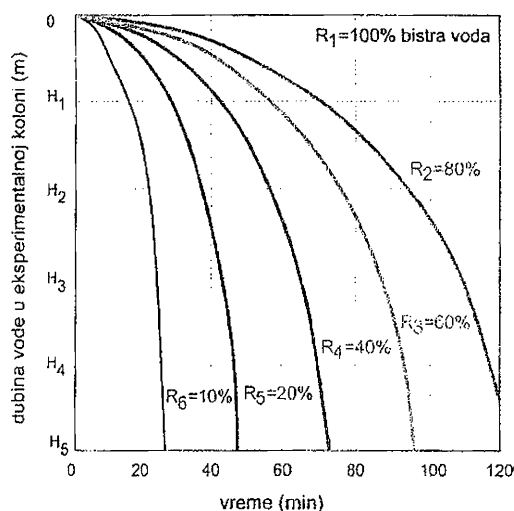
$$f(x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad 2.37$$

Po istom principu se ponovi procedura i dobije slika kako se tih 10 % čestica uklanja po vremenu i dubini.



Slika 2.13. Pomeranje linije sa istim udelom istaloženih čestica duž kolone sa vremenom

Na isti način, ponavljanjem određivanja pojedinih tačaka, može se ponoviti procedura za bilo koji procentualni udeo čestica ali uobičajno je da se uzimaju vrednosti od 20, 40, 60 i 80 % uklanjanja čestica, pa se iz polaznih podataka dobijaju linije sa istim procentualnim udelima istaloženih čestica duž kolone sa vremenom, slika 2.14.



Slika 2.14. Linije sa istim udelom istaloženih čestica pri agregatnom taloženju

Tokom vremena, formirani agregati, sa odgovarajućom brzinom taloženja, će se za različito vreme istaložiti, pa to i uslovljava da se duž kolone uklanja različit procenat čestica sa vremenom. Na dijagramu je moguće, za određeno vreme, odrediti kolika je širina zone između dva odabrana procentualna udela, a koje se obeležavaju sa Δh , slika 2.15. Svaka ta širina zone se u bezdimenzionom obliku može izraziti ako se podeli sa ukupnom dubinom kolone na kojoj su uzorci uzimani, H .

Ako se posmatra promena udela istaloženih čestica za bilo koje Δh , onda se može aproksimirati da će duž te dubine, neka srednja količina istaloženih čestica u tom intervalu biti aritmetička srednja vrednost tih odabranih procentualnih vrednosti, za odabrano vreme taloženja, tj:

$$C_{i(\Delta H)} = \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right) \quad 2.38$$

Ukupan udeo istaloženih čestica sa tim procentualnim izdvajanjem je u vezi sa dužinom tog intervala u kome se uzima ta prosečan vrednost, u odnosu na ukupnu dubinu taložnika, tj. $\Delta h/H$, pa je ukupni procentualni udeo istaloženih čestica za taj interval proporcionalan njihovom proizvodu:

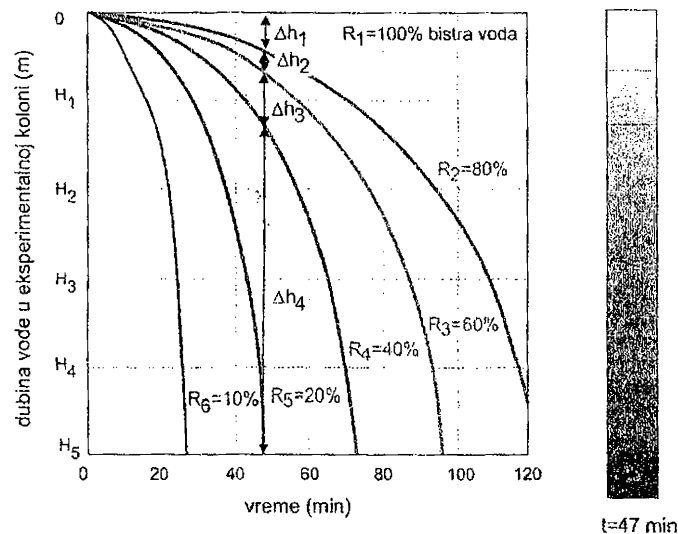
$$R_{t(\Delta H)} = \frac{\Delta h}{H} \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right) \quad 2.39$$

Jednostavnim sabiranjem svih vrednosti u određenom vremenu, moguće je dobiti ukupan udeo istaloženih čestica u taložniku tokom definisanog vremena, t , pa je shodno podacima na prethodnoj slici, u vremenu $t = 47 \text{ min}$:

$$R_T = \frac{\Delta h_1}{H} \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) + \frac{\Delta h_2}{H} \left(\frac{R_2 + R_3}{2} \right) + \frac{\Delta h_3}{H} \left(\frac{R_3 + R_4}{2} \right) + \frac{\Delta h_4}{H} \left(\frac{R_4 + R_5}{2} \right)$$

2.40

- R_T udeo čestica koje će biti istaložene u vremenu t
 $\Delta h_{1..4}$ debljina pojedinih slojeva između dva definisana udela čestica koje se talože
 $R_{1..5}$ udeo čestica koji će biti istaložen u taložniku tokom vremena
 $H = H_5$ ukupna dubina vode u kojoj se vrši taloženje i uzimanje uzoraka, m



Slika 2.15. Određivanje udela istaloženih čestica u određenom trenutku

U praksi je uvek potrebno predvideti određeni stepen sigurnosti, pa je potrebno vreme taloženja preporučljivo uvećati, tj. pomnožiti sa 1,5 - 2,0, dok eksperimentalno određenu brzinu taloženja, valja umanjiti, tj. pomnožiti sa 0,65, Time se obezbeđuje da realni taložnik može raditi sa većom efikasnošću i da ima prostora za eventualna odstupanja u kvalitetu otpadne vode koja dolazi u taložnik.

U praksi je uvek potrebno predvideti određeni stepen sigurnosti, pa je potrebno vreme taloženja preporučljivo uvećati, tj. pomnožiti sa 1,5 – 2,0, dok eksperimentalno određenu brzinu taloženja, valja umanjiti, tj. pomnožiti sa 0,65. Time se obezbeđuje da realni taložnik može raditi sa većom efikasnošću i da ima prostora za eventualna odstupanja u kvalitetu otpadne vode koja dolazi u taložnik.

2.5. Flotacija

Flotacija je proces molekularnog „slepljivanja“ čvrstih čestica materijala prisutnog u otpadnoj vodi na graničnoj površini sa gasom koji je dispergovan u njoj. U tu svrhu se najčešće koristi vazduh koji se disperguje sa dna bazena i koji na putu naviše „kupi“ čestice i silom potiska odnosi ih na površinu, gde se, koncentrisane u vidu pene, odnose i uklanjaju.

Proces ovog spajanja zavisi od niza faktora, a najznačajniji su:

- višak slobodne energije na graničnim slojevima,
- površinske pojave kvašenja i
- veličina i odnos veličina čestica zagađujućih materija i mehurova gasa.

Flotacija se koristi kao alternativna metoda drugim separacionim postupcima, poput sedimentacije, separacije, centrifugiranja ili filtracije, od kojih je često efikasnija ili ekonomski opravdanija.

Flotacija se u obradi otpadnih voda primenjuje za:

- uklanjanje suspendovanih i emulgovanih zagađujućih materija i
- koncentraciju bioloških muljeva.

U poređenju sa sedimentacijom brža je 6 – 8 puta i obično traje 15 – 30 minuta. Pri tome se obezbeđuje visok stepen uklanjanja suspendovanog materijala, značajno smanjuje koncentracija površinski aktivnog materijala u otpadnoj vodi i povećava sadržaj kiseonika, što u znatnoj meri olakšava kasnije faze obrade.

Svi flotacioni postupci, koji se primenjuju u praksi, mogu se podeliti u dve grupe:

- prirodna flotacija i
- stimulisana flotacija.

Postupci stimulisane flotacije mogu se dalje podeliti na više načina, i to zavisno od uvođenja gasa u tečnu fazu, načina stvaranja gasnih mehurova, načina uklanjanja flotiranog materijala itd. Usvajajući podeļu postupaka prema načinu uvođenja gasa u tečnu fazu, razlikuju se sledeći načini flotacije:

- flotacija rastvorenim vazduhom (flotacija pod pritiskom, vakuum i air-lift flotacija),
- flotacija dispergovanim vazduhom (mehanička i pneumatska),
- elektroflotacija i
- bioioška i hemijska flotacija.

U tretmanu otpadnih voda posebno je efikasna flotacija rastvorenim vazduhom i sa razvojem novih dostupnih tehnika i materijala, gotovo da je potisnula druge vidove flotacije. Primenjuje se za izdvajanje jako dispergovanih ili suspendovanih čestica zagađujućih materija, pošto je moguće ostvariti veoma male dimenzije mehurova. Postupak se sastoji u pravljenju presičenog rastvora vazduha u otpadnoj vodi, pri povišenom pritisku, a potom njegovog uvođenja u bazen za flotaciju, koji se nalazi pod atmosferskim pritiskom. Pri smanjenju pritiska na nivo atmosferskog, po ulasku u flotacioni bazen, vazduh se izdvaja iz vode, formirajući mikro mehurove koji flotiraju čestice zagađenja. Da bi se postigao zadovoljavajući efekat flotacije, količina vazduha koja se mora izdvojiti iz otpadne vode, mora se kretati u granicama 2 – 5 % zapremine vode koja se obrađuje. Efikasnost procesa flotacije rastvorenim vazduhom u velikoj meri zavisi od odnosa količina vazduh-čestice zagađujućih materija. Odnos masa vazduha i zagađujućih materija, koji se označava kao A/S , mora imati optimalnu vrednost da bi se flotacija obavljala efikasno, jer se prevelikim dovođenjem vazduha iznad nekih optimalnih vrednosti neće povećati uklanjanje suspendovanih materija.

Rastvaranje vazduha u otpadnoj vodi može biti u samoj ulaznoj struji vode, u delu ulazne struje ili u recirkulacionom toku već prečišćene vode.

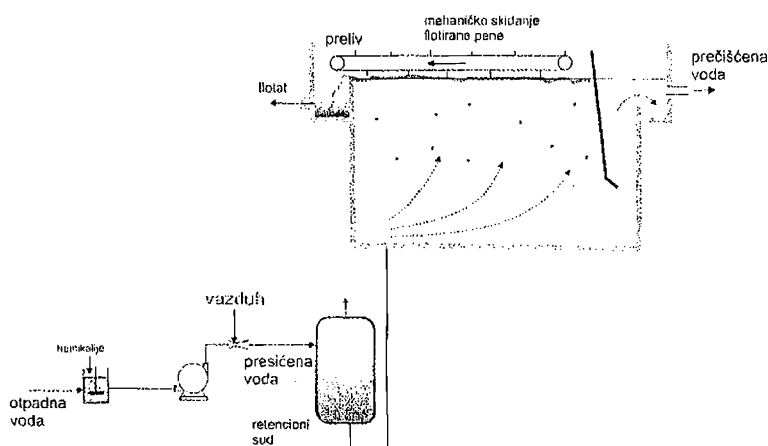
Kada se za flotaciju koristi rastvoreni vazduh, onda se računa odnos potrebnog masenog protoka vazduha koji se upotrebljava za flotaciju, prema masenom protoku suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, koji se piše u obliku A/S .

Rastvaranje vazduha u celokupnoj ulaznoj struji vode, slika 2.16, u ovom slučaju odnos A/S računa se pomoću jednačina:

$$\frac{A}{S} = 1,3a \frac{(FP-1)}{X} \quad 2.41$$

$$\frac{A}{S} = 1,3a(f) \frac{(P-1)}{X} \quad 2.42$$

- A* maseni protok vazduha upotrebljenog za flotaciju, *kg/h*
S maseni protok suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, *kg/h*
 1,3 vrednost gustine vazduha *mg/mL*, na pritisku od 1 *atm*
a vrednost rastvorljivosti vazduha u vodi na radnim uslovima i pritisku od 1 *atm*, *mg/mL*
P pritisak pod kojim se vazduh uvodi u vodu, *atm*
f za pritiske *P* veće od 1 *atm*, 0,167 – 1,0
F za pritiske *P* veće od 2 *atm*, 0,5 – 1,0
X koncentracija suspendovanih čestica u otpadnoj vodi, *mg/L*



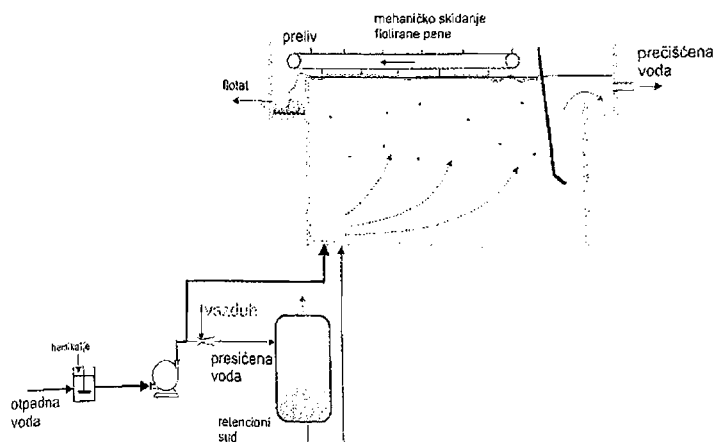
Slika 2.16. Flotacija rastvaranjem vazduha u ulaznoj struji

Flotacija sa rastvaranjem gasa u delu ulazne struje otpadne vode, slika 2.17, odnos *A/S* se računa po jednačinama:

$$\frac{A}{S} = 1,3aQ_p \frac{(FP-1)}{QX} \quad 2.43$$

$$\frac{A}{S} = 1,3aQ_p (f) \frac{(P-1)}{QX} \quad 2.44$$

- Q_p* deo protoka otpadne vode u koji se uvodi vazduh pod pritiskom, *L/s*
Q protok otpadne vode u flotacionom bazenu, *L/s*



Slika 2.17. Flotacija rastvaranjem vazduha u delu ulazne struje

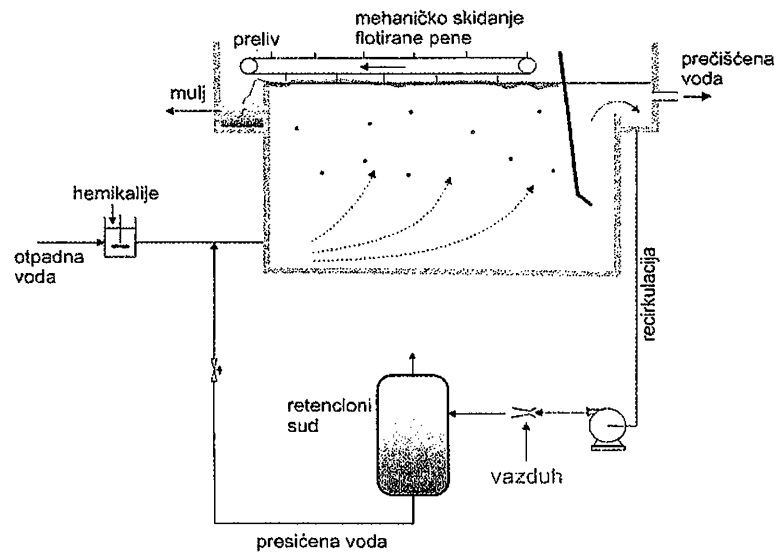
Flotacija sa rastvaranjem gasa u recirkulacionoj struji otpadne vode, slika 2.18, odnos A/S se računa po jednačinama:

$$\frac{A}{S} = 1,3a \left(\frac{Q_r}{Q} \right) \frac{(FP-1)}{X} \quad 2.45$$

$$\frac{A}{S} = 1,3a \left(\frac{Q_r}{Q} \right) (f) \frac{(P-1)}{X} \quad 2.46$$

Q_r deo protoka otpadne vode koji se recirkuliše, L/s

$R = \frac{Q_r}{Q}$ recirkulacioni odnos (odnos protoka otpadne vode koji se recirkuliše i ulaznog protoka)



Slika 2.18. Flotacija rastvaranjem vazduha u delu povratne struje vode

Kod rešavanja praktičnih problema vezanih za flotaciju potrebno je odrediti količinu vazduha za uklanjanje određene količine čestica iz otpadne vode (ili za zgušnjavanje mulja), koja su to površinska opterećenja čvrstim materijama, odnosno, koja je geometrija flotacione komore.

3. FIZIČKO-HEMIJSKI TRETMAN

3.1. Koagulacija i flokulacija

U otpadnoj vodi se, pored suspendovanih čestica mogu nalaziti i koloidne čestice, koje se odlikuju relativno malom veličinom, u opsegu $0,001 - 1 \mu m$, pa sile zemljine teže ne mogu na njih značajnije uticati. Istovremeno, ove čestice su naelektrisane i usled međusobnog odbijanja, „lebde“ u masi vode, a nemaju ni sposobnost da učestvuju u hemijskim reakcijama, jer su po prirodi inertne, tako da se za njihovo uklanjanje ne mogu primeniti ni postupci hemijskog taloženja. Koloidne čestice povećavaju mutnoću vode i njihovo uklanjanje se najčešće obavlja postupkom koagulacije i flokulacije. Razvojem novih materijala, susreće se i primena membranskih procesa ali je u mnogim slučajevima, u zavisnosti od karakteristika otpadne vode, postupak koagulacije i flokulacije nezamenljiv.

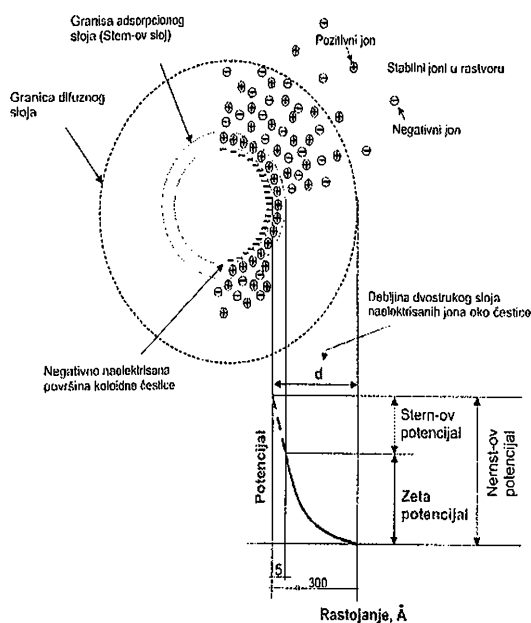
Ranije je koagulacija i flokulacija najčešće primenjivana u postupcima pripreme vode za piće i uklanjanje mutnoće u njoj, međutim, u novije vreme sve više se ovaj postupak koristi i za uklanjanje zagađujućih materija iz otpadnih voda, poput metalnih jona, toksičnih organskih komponenti, virusa i radionukleida. Ovo se vrši korišćenjem efekta njihove adsorpcije za koloidne čestice, a potom povlačenja u talog, kojim se odvajaju iz otpadne vode.

Mali prečnik koloidnih čestica doprinosi da one imaju relativno veliku kontaktnu površinu sa kojom su u dodiru sa vodom, kao i relativno mali odnos mase čestica i njihove ukupne površine. Zbog toga, dominantnu ulogu na ponašanje koloidnih čestica ima njihova kontaktna površina i procesi koji se odigravaju na njoj. Na površini koloidnih čestica se odigrava interakcija između vode i čestica, čestica i drugih čestica iz okruženja, kao i čestica i prisutnih hemikalija u vodi.

Stabilnost rastvora koloidnih čestica zavisi od njihovih elektro-kinetičkih karakteristika. Svaki koloidni sistem treba razumeti kao sistem u kome dolazi do neprekidnog kretanja čestica, pod dejstvom raznih sila, pa je otuda potrebno poznavati kinetičke karakteristike sistema. Istovremeno,

prisutno je i naelektrisanje koloidnih čestica, koje može biti bilo pozitivno, bilo negativno. Ipak, za većinu koloidnih rastvora u vodenoj sredini, karakteristično je da čestice imaju negativno naelektrisanje, slika 3.1.

Negativno naelektrisanje koloidnih čestica privlači pozitivne jone iz vode u kojoj se čestice nalaze. Ti pozitivni joni se adsorbiraju na površini koloidne čestice i okružuju je, formirajući tzv. adsorpcijski ili Šternov (Stern) sloj, predstavljen na slici 3.1. Tako formiran sloj sa pozitivnim jonima privlači druge negativne jone iz vode, pa se joni i pozitivni i negativni grupišu oko čestice. U zavisnosti od jačine električnog polja, oko same koloidne čestice, formira se novi sloj, sa mešovitim, pozitivnim i negativnim jonima koji difuzijom „pristižu“ do čestice, pa se taj sloj naziva difuzijski sloj. Zajedno, adsorpcijski i difuzijski sloj, čine tzv. električni dvosloj (ili dielektrični sloj), čija je debljina označena sa d . Unutar svakog od ovih slojeva, kao i unutar samog dvosloja, javlja se određeni električni napon (potencijal).



Slika 3.1. Struktura dvostrukog sloja naelektrisanja oko koloidne čestice

Ukupni elektropotencijal koji se javlja između površine koloidne čestice i vode koja ga okružuje naziva se Nernstov (Nernst) potencijal. Ovaj

potencijal ima najveću vrednost na samoj površini koloidne čestice i opada prolaskom kroz Šternov sloj, upravo za vrednost tzv. Šternovog potencijala.

Daljim udaljenjem od čestice i prolaskom kroz difuzioni sloj, Nernstov potencijal opada sve dok ne dođe do kraja difuznog sloja kada ima vrednost nula. Vrednost potencijala koji je jednak razlici između potencijala od ivice adsorpcionog (Šternovog) sloja, pa do kraja difuzionog sloja, naziva se Zeta potencijal i to je fizički merljiva veličina.

Upravo vrednost Zeta potencijala ima dominantnu ulogu u međusobnom odbijanju koloidnih čestica, odnosno samoj stabilnosti koloidnog rastvora.

Što je Zeta potencijal veći, to je rastvor stabilniji. Ukoliko se određenim procesom, promenom fizičkih uslova ($T, pH...$) ili dodatkom hemikalija, utiče na njegovo smanjenje, to se povećava njegova nestabilnost, a samim tim i mogućnost da se koloidne čestice uklone iz vode.

Debljina difuzionog sloja zavisi od koncentracije jona u vodenom rastvoru.

Kada je ta koncentracija relativno mala (mala jonska jačina) onda se difuzioni sloj širi, njegova debljina d , postaje veća. Nasuprot tome, kada je koncentracija jona u vodi velika (velika jonska jačina), sami prisutni joni „sabijaju“ difuzioni sloj i njegova debljina je manja.

Uticanjem na debljinu difuzionog sloja moguće je uticati i na verovatnoću spajanja samih koloidnih čestica i njihovo ukрупnjavanje, što je i preduslov njihovog uklanjanja iz vode. Dodatkom koagulanata utiče se na debljinu slojeva koji okružuju koloidnu česticu tako što se oni tanje, što predstavlja osnov procesa koagulacije.

Koagulacija je fizičko-hemijski proces prevođenja kvazi-jednofaznog u pravi dvofazni sistem, što se postiže destabilizacijom koloidnih čestica hemijskim sredstvima, čime se ostvaruje preduslov za njihovu agregaciju.

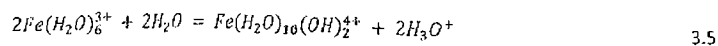
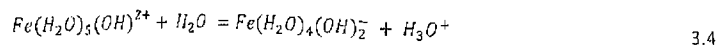
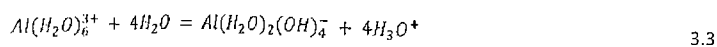
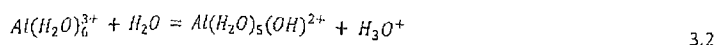
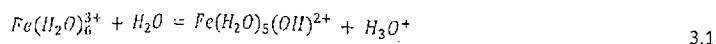
Flokulacija je samo fizički proces formiranja mase krupnih flokula od sitnih destabilizovanih koloidnih čestica povećavanjem gradijenta brzine.

Hemijska sredstva koja u procesu koagulacije izazivaju destabilizaciju koloidnih rastvora, nazivaju se koagulant i najčešće su to jedinjenja aluminijuma i gvožđa. Kao aluminijumski koagulant koriste se:

aluminijum sulfat, aluminijum hlorid, natrijum aluminat, aluminijum hlorohidrat, polialuminijum hlorid, polialuminijum sulfat hlorid, polialuminijum silikat hlorid i oblici polialuminijum hlorida sa organskim polimerima. Koagulantni bazirani na gvožđu su gvožđe sulfat, gvožđe hlorid, gvožđe hlorid sulfat, poliferi sulfat i soli gvožđa sa organskim polimerima.

Koagulantni na bazi aluminijuma i gvožđa se vrlo često primenjuju u tretmanu voda kako zbog efikasnosti tako i zbog niske cene i dostupnosti.

Katjoni Al i Fe, kao proste jonske vrste, su uvek hidratizirani. U vodi formiraju komplekse tipa $Me(H_2O)_6^{3+}$, a molekuli vode vezani za centralni metalni jon, nazivaju se ligandi. Kompleksi ovog tipa ponašaju se kao slabe kiseline tj. donori protona, pa se u vodenoj sredini, kada je koncentracija Al ili Fe soli manja od proizvoda rastvorljivosti njihovih hidoksida, obrazuju monomerni, dimerni ili čak polimerni hidrosometalni kompleksi, sa OH^- jonima kao ligandima. Neke od ovih hidrolitičkih reakcija su:



Međutim, ukoliko je dodata količina koagulantna dovoljna da se premaši vrednost proizvoda rastvorljivosti metalnog hidoksida, pored ovih relativno jednostavnih hidrosometalnih kompleksa, obrazovaće se i koloidni hidrosometalni polimeri, a na kraju i talog metalnog hidoksida.

Doze koagulantna koje se koriste u praksi, dovoljne su da se premaši proizvod rastvorljivosti hidoksida, pa se destabilizacija koloida obavlja adsorpcijom hidrosometalnih polimera koloidnih dimenzija, koji predstavljaju intermedijare ka precipitaciji metalnih hidoksida.

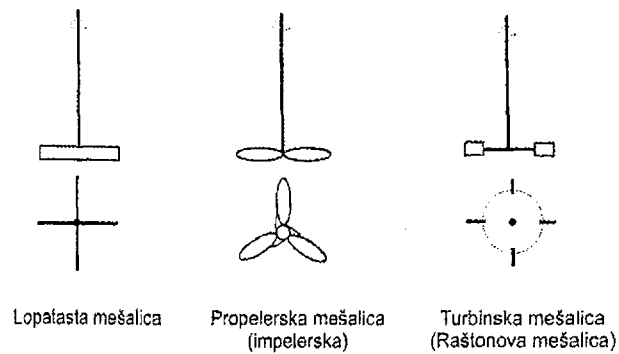
Pri pH vrednostima ispod izoelektrične tačke dominiraju pozitivno naelektrisani polimeri i oni destabilišu negativno naelektrisane koloidne čestice adsorpcijom uz neutralizaciju naelektrisanja. Ako su vrednosti pH

iznad izoelektrične tačke, dominiraju *anjonski polimeri* i oni destabilizuju koloide mehanizmom adsorpcije i međučestičnog povezivanja.

Kada se metalna so, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, ili metalni oksid i hidroksid (npr. CaO i $Ca(OH)_2$) koriste kao koagulantí u dovoljno velikim dozama da može doći do brze precipitacije (taloženja) metalnog hidroksida ($Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$) ili karbonata ($CaCO_3$), može doći do koprecipitacije koloidnih čestica i čestica hidroksida ili karbonata. U tom slučaju dolazi do inkorporiranja koloidnih čestica u talog hidroksida tj. karbonata pri njihovom stvaranju i taloženju. Da bi do taloženja uopšte došlo, moraju postojati jezgra taloženja, a tu ulogu mogu preuzeti i same koloidne čestice, pa tada brzina taloženja raste sa porastom ukupne koncentracije koloidnih čestica koje se uklanjaju iz sistema. Iz ovoga se može izvesti zanimljiv zaključak, da što je veća koncentracija koloida u vodi, potrebna je manja doza metalnog koagulanta, za njihovo uklanjanje.

U procesima flokulacije, kao hemijska sredstva, najčešće se dodaju jedinjenja na bazi kaolina, odnosno, u novije vreme sintetički polimeri koji obezbeđuju uslove za stvaranje flokula.

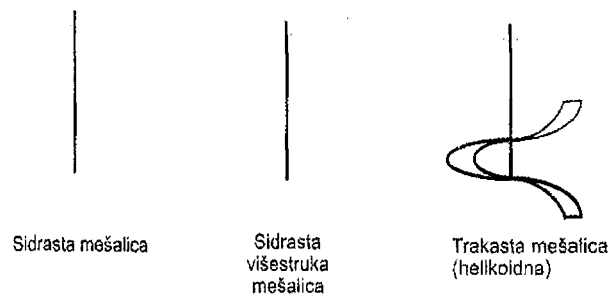
Za izvođenje procesa koagulacije i flokulacije neophodno je da dođe do sudara čestica, što se obezbeđuje mešanjem vode. Za koagulaciju se primenjuje brzo mešanje, sa tzv. brzim mešačima, slika 3.2., a za proces flokulacije se koristi sporo mešanje, slika 3.3. Brzo mešanje kod koagulacije se primenjuje zbog toga što je potrebno ostvariti što intenzivniji kontakt pozitivno naelektrisanih hidratanih jona koagulanta sa negativno naelektrisanim koloidnim česticama. Sporo mešanje kod flokulacije se primenjuje da bi došlo do ukрупnjavanja agregata koji se mogu lakše staložiti, a da pri tome ne dođe do njihovog raspadanja (deflokulacije).



Slika 3.2. Vrste mešalica za izvođenje koagulacije

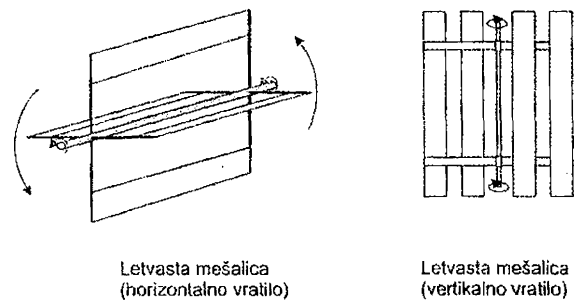
U zavisnosti od načina mešanja, pravi se i izbor mešalica koje mogu biti korišćene. Za brzo mešanje koriste se lopataste, propelerske i turbinske mešalice.

Za izvođenje procesa flokulacije mogu se koristiti mešalice sa malim brojem obrtaja, poput sidrastih i trakastih (helikoidnih).



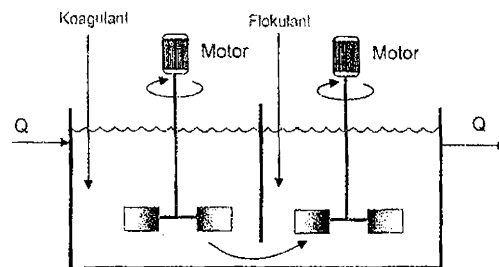
Slika 3.3. Spore mešalice za izvođenje flokulacije

U praktičnoj primeni, za mešanje u flokulacionim bazenima, najčešće se primenjuju tzv. letvaste mešalice, koje u zavisnosti od tačke oslonca mogu biti sa horizontalnim ili vertikalnim vratilom, slika 3.4.

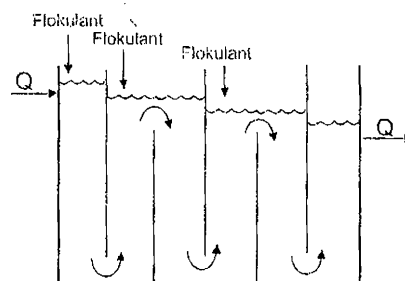


Slika 3.4. Letvaste mešalice

Pored mehaničkog mešanja, u procesima koagulacije i flokulacije mogu biti korišćeni i višekomorni protočni sistemi, slika 3.5., sa promenljivom brzinom kretanja vode, u zavisnosti da li se u njima izvodi proces koagulacije, (sa intenzivnim mešanjem) ili proces flokulacije (sa sporim mešanjem), kao i protočni višekomorni sistemi, slika 3.6.



Slika 3.5. Povezani bazeni za koagulaciju i flokulaciju



Slika 3.6. Višekomorni protočni sistem

Nezavisno o kakvom tipu mešanja je reč, sa tehnološkog aspekta, neophodno je analizirati kolika je potrebna snaga da bi se mešanje sa

određenim tipom mešača i željenog broja obrtaja izvršilo, kao i kakav je uticaj unete snage mešanja na dešavanja u sistemu.

Snaga mešanja se određuje na osnovu Rejnoldsovog broja mešanja,

$$Re_i = \frac{\rho N D_i^2}{\mu} \quad 3.6$$

ρ gustina vode, kg/m^3

μ viskozitet vode, $Pa \cdot s$

N broj obrtaja mešalice, $1/min$

D_i prečnik lopatica mešalice, m

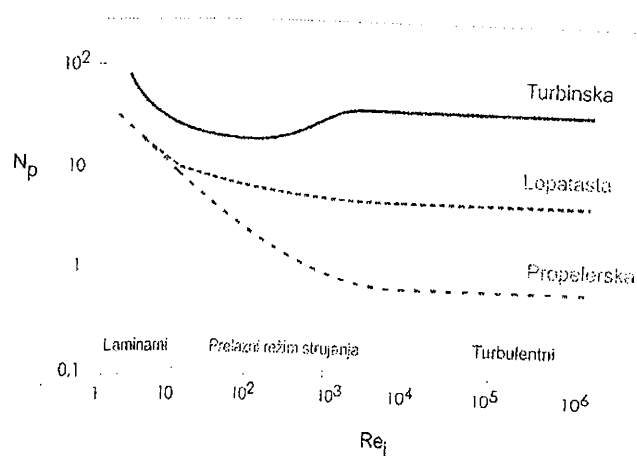
i faktora snage:

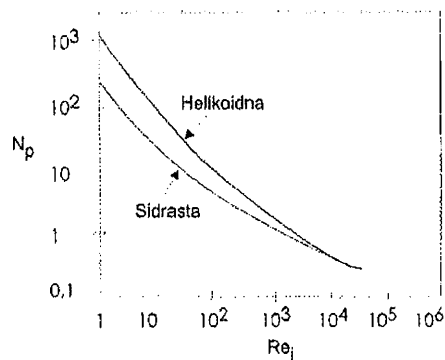
$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} \quad 3.7$$

N_p faktor snage

P potrebna snaga na vratilu mešalice, kW

Funkcionalna zavisnost faktora snage, N_p od Rejnoldsovog broja mešanja, Re_i , za različite tipove mešalice, predstavljena je na slici 3.7.





Slika 3.7. Funkcionalna zavisnost faktora snage N_p od Reynoldsovog broja, za određeni tip mešalice

Za određeni tip mešalice funkcionalna zavisnost faktora snage, N_p od Reynoldsovog broja, se posebno može analizirati za dve različite oblasti:

Pri laminarnom strujanju ($Re < 10$) na snagu mešalice, P , utiče viskozitet vode, a izračunava se po jednačini:

$$P = K_L n^2 D_i^3 \mu \quad 3.8$$

K_L konstanta impelera pri laminarnom strujanju

n broj obrtaja, $1/min$

D_i prečnik impelera, m

Pri turbulentnom strujanju ($Re > 10\,000$) snaga impelera zavisi od gustine fluida i računa se kao:

$$P = K_T n^3 D_i^5 \rho \quad 3.9$$

K_T konstanta impelera za turbulentno strujanje

ρ gustina vode, kg/m^3

Vrednosti konstanti K_L i K_T su date u tabeli 3.1.

Ukoliko se koriste mehanički flokulatori sa letvama snaga se može izračunati po jednačini:

$$P = F_D v_r \quad 3.10$$

F_D vučna sila na letvama, N

v_r relativna brzina letvica u odnosu na vodu, obično iznosi $\frac{1}{4}$ periferne brzine lopatica, m/s

Vučna sila na letvama se može računati po jednačini:

$$F_D = \frac{C_D A \rho v_r^2}{2} \quad 3.11$$

C_D koeficijent trenja
 A površina letvi pod uglom kretanja, m^2

$$P_T = C_D A \rho \frac{v^3}{2} \quad 3.12$$

P_T snaga po točku, kW
 A površina letvi na točku, m^2
 ρ gustina vode, kg/m^3
 v relativna brzina letve u odnosu na brzinu vode, m/s

Tabela 3.1. Vrednosti konstanti K_L i K_T u zavisnosti od tipa mešalice

Tipovi mešalice	K_L	K_T
Raštonova (Rushton) turbinska	70	5 – 6
Lopatasta	35	2
Propelerska	40	0,35
Sidrasta	420	0,35
Helikoidna	1000	0,35

Da bi se odredila relativna brzina između kretanja vode kroz bazen i brzine kretanja vrha letve kroz vodu koja teče, neophodno je izračunati vrednost brzine kretanja ivice letve, tj. periferne brzine letve. Ona se računa po jednačini:

$$v_p = n\pi D \quad 3.13$$

v_p periferna brzina letve, m/s
 n brzina okretanja letve, $obrtaj/min$
 D spoljni prečnik putanje letve, m

Iz svih prethodno definisanih jednačina uočava se da na snagu mešanja utiču samo karakteristike fluida i mešalice, ali ne i zapremina vode u kojoj se mešanje izvodi. Međutim, iz podatka o veličini snage mešanja ne

može se znati kakav efekat mešanje izaziva na sredinu koja se meša. Jasno je da neće biti isti efekti mešanja u manjem i većem sudu, iako je potrebna ista snaga mešanja.

Stoga je neophodno uključiti novu veličinu koja može da poveže snagu mešanja i zapreminu u kojoj se to mešanje izvodi, a to je gradijent brzine, definisan sledećom jednačinom:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad 3.14$$

- G gradijent brzine, s^{-1}
- P snaga, W
- μ viskozitet vode, $kg/m \cdot s$
- V zapremina bazena, m^3

Na kvalitet mešanja utiče vrednost gradijenta brzine, vreme mešanja, kao i proizvod gradijenta i vremena mešanja, čiji su opsezi za odgovarajuće sisteme dati u tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Vrednosti gradijenta brzine

Proces	G, s^{-1}	t, s	Gt
Kanalski koagulator	100 – 150	promenljivo	-
Flokulacija koja prethodi filtraciji	20 – 75	900 – 1500	40000 – 75000
Konvencionalna flokulacija	10 – 60	1000 – 1500	30000 – 60000

Kod mešanja u flokulatorima najčešće su primenjivane letvaste mešalice koje su u obliku točka postavljene na vratilu. Ako se jednačina za potrebnu snagu svih letvi na točku zameni u jednačinu za gradijent brzine 3.14, dobija se:

$$G = \sqrt{C_D A \rho \frac{v^3}{2\mu V}} \quad 3.15$$

Faktor C_D je u funkciji karakteristika lopatica i uslova strujanja, tj. Reynoldsovog broja i uobičajena vrednost mu je 1,8. Za turbulentan režim, tj. vrednost Re broja iznad 10^5 , računa se po jednačini:

$$C_D = 0,008 R_e + 1,3 \quad 3.16$$

pri čemu se, za mešalicu prečnika D , Reynoldsov broj uobičajeno računa kao:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 3.17$$

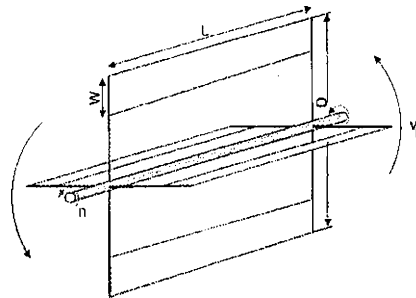
odnosno kada je reč o mešanju sa letvastim mešalicama, slika 3.8:

$$R_e = \frac{L}{W} \quad 3.18$$

L dužina letve, m

W širina letve, m

Faktor trenja za letvaste mešalice se izračunava na osnovu odnosa dužine prema širini letve, tabela 3.3.



Slika 3.8. Letvasta mešalica

Tabela 3.3. Vrednosti C_D faktora kod letvastih mešalica

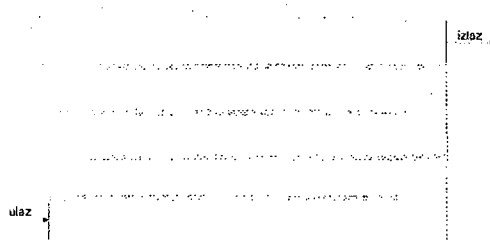
Odnos dužine prema širini letve	C_D
5	1,20
20	1,50
∞	1,90

U bazenima u obliku kanala sa naizmeničnom promenom smera strujanja, slika 3.9, gde je međučestično povezivanje obezbeđeno hidrauličkim mešanjem, rasipanje snage je proporcionalno padu pritiska u samom bazenu, pa se može pisati:

$$P = Q\rho gh_f \quad 3.19$$

Q protok vode, m^3/s

h_f pad pritiska u bazenu izražen u visini vodenog stuba, m



Slika 3.9. Bazen u obliku kanala sa naizmeničnom promenom smera strujanja

Pad pritiska u ovom bazenu (sa krivudavim tokom) može se izračunati po jednačini:

$$h_f = nK \frac{v^2}{2g} \quad 3.20$$

n broj krivina koje voda prolazi u bazenu

K konstanta 2,0 – 4,0 zavisno od geometrije odbojnika

v brzina vode u kanalu, m/s

Na osnovu prethodno definisanih veličina može se izračunati gradijent brzine u flokulatoru sa hidrauličkim mešanjem:

$$G = \sqrt{\frac{Q\rho gh_f}{\mu V}} = \sqrt{\frac{\rho gh_f}{\mu t}} = \sqrt{\frac{gh_f}{vt}} \quad 3.21$$

t vreme zadržavanja vode u bazenu, $t = V/Q$

ν kinematski viskozitet vode, m^2/s

Efikasnost procesa koagulacije i flokulacije najviše zavisí od adekvatnog i efikasnog mešanja. Sa tim u vezi je potrebno izračunati potrebne snage mešalice i njihovu brzinu okretanja u bazenima u zavisnosti od zapremine bazena, odgovarajućeg gradijenta brzine i geometrije mešalice.

3.2. Hemijska precipitacija

Hemijska precipitacija (taloženje) je proces u kome se dodavanjem odgovarajućih hemijskih sredstava u otpadnu vodu, rastvorene i suspendovane komponente prevode u oblike koji se talože.

Sam proces se zasniva na dodavanju hemijskih jedinjenja vodi, koja su sposobna da reaguju sa prisutnim jonima i to tako da svojim ukupnim koncentracijama prevaziđu proizvod rastvorljivosti jedinjenja koje grade tokom reakcije. Na taj način prisutni joni se prevode iz rastvornog u taložni oblik i uklanjaju iz vode.

Ovaj postupak ima široku primenu ali i izvesna ograničenja u pogledu količina stvorenog taloga. U tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda najčešće se koristi za uklanjanje prisutnih teških metala, koji bi u kasnijoj fazi biološke obrade mogli da predstavljaju problem.

Klasičan postupak taloženja može imati svoja ograničenja kada je veličina suspendovanih čestica mala i kada su prisutna zagađenja u rastvoru. Prevazilaženje ovog problema i povećanje udela istaloženih suspendovanih materija, vrši se dodavanjem hemikalija koje reaguju sa prisutnim zagađenjem u otpadnoj vodi, gradeći slabo rastvorljiva jedinjenja koja, istovremeno, taložeći se, mogu da vežu i dodatne količine suspendovanih čestica i zajedno padnu na dno taložnika.

Ovo je relativno brz proces, pa je za njegovo izvođenje potrebno relativno kratko hidrauličko vreme boravka. Pošto se taloženje jona u obliku slabo rastvorljivih jedinjenja obavlja sve do uspostavljanja ravnoteže, to je u osnovi proces hemijske precipitacije zasnovan na principu uspostavljanja heterogene hemijske ravnoteže.

Na primer, kada se u rastvor u kome su prisutni Ca^{2+} -joni dodaje natrijum-sulfat, dolazi do reakcije:



Slabo rastvorljiv $CaSO_4$ je u ravnoteži sa Ca^{2+} i SO_4^{2-} jonima u vodi:



Konstanta ravnoteže ove reakcije je:

$$K = \left\{ Ca^{2+}_{(aq)} \right\} \cdot \left\{ SO_4^{2-}_{(aq)} \right\} \quad 3.24$$

Kada je rastvorljivost soli veoma niska koeficijenti aktivnosti jona u rastvoru su skoro jednaki jedinici, pa usvajanjem da oni imaju vrednost jedan, dobija se jednačina definisana kao proizvod rastvorljivosti, a obeležava sa K_{sp} , tj.

$$K_{sp} = [Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] \quad 3.25$$

Njena vrednost zavisi od temperature i za odgovarajuće jedinjenje može se pronaći u hemijsko-inženjerskim priručnicima.

U slučaju $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ proizvod rastvorljivosti se izračunava kao:

$$K_{sp} = [Ca^{2+}]^5 \cdot [OH^-] \cdot [PO_4^{3-}]^3 \quad 3.26$$

Iz vrednosti proizvoda rastvorljivosti može se izračunati minimalna koncentracija potrebna za taloženje prisutnog jona.

Kod realnih rastvora često se javljaju jonski parovi usled jon-jon interakcije, pa se zbog toga, umesto koncentracije, koristi aktivnost jona, definisana kao:

$$a_i = \gamma \cdot [C_i] \quad 3.27$$

a_i aktivnost i-tog jona, mol / L

γ koeficijent aktivnosti i-tog jona

C_i koncentracija i-tog jona, mol / L

Vrednost koeficijenta aktivnosti se određuje na osnovu jonske jačine određene jonske vrste, pomoću jednačine:

$$\log \gamma = -\frac{0,5 \cdot Z^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad 3.28$$

Odnosno,

$$\gamma = 10^{-\frac{0,5 \cdot Z^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}} \quad 3.29$$

gde je I jonska jačina definisana kao:

$$I = \frac{1}{2} \sum [C_i] Z_i^2 \quad 3.30$$

C_i koncentracija i -tog jona, mol / L

Z naelektrisanje jona

Jednačina 3.30 je primenljiva samo ukoliko jonska jačina ne prelazi $0,1 M$. U literaturi se mogu naći i druge jednačine za koeficijent aktivnosti.

Jonska jačina se može predstaviti i izrazom ukupnog broja disosovanih jona:

$$I = 2,5 \times 10^{-5} \cdot TDS \quad 3.31$$

TDS ukupan broj disosovanih jona u vodi, mg / L

Elementi čije se uklanjanje hemijskom precipitacijom najčešće razmatra su arsen (As), barijum (Ba), kadmijum (Cd), bakar (Cu), živa (Hg), nikal (Ni), selen (Se) i cink (Zn). Većina ovih elemenata može se taložiti u obliku hidroksida ili sulfida. Proizvodi rastvorljivosti nekih hidroksida i sulfida dati su u tabeli 3.4.

U postrojenjima za tretman otpadnih voda joni metala se talože uglavnom kao hidroksidi, uz dodavanje kreča, $Ca(OH)_2$ i sode, Na_2CO_3 , na prethodno podešenoj vrednosti pH .

Osnovni zadatak pri primeni hemijske precipitacije je da se odredi koje hemijsko sredstvo treba da se upotrebi za efikasno uklanjanje određenih jedinjenja u otpadnoj vodi i u kojoj količini. Posebno se mora proračunati koja se masa taloga dobija u procesu precipitacije, jer njegov dalji tretman i odlaganje može imati i tehno-ekonomske ali i posledice po životnu sredinu.

Tabela 3.4. Proizvodi rastvorljivosti za neka teško rastvorljiva jedinjenja

	polu-reakcija	Ksp
Kadmijum(II)-hidroksid	$\text{Cd}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{OH}^-$	13,93
Kadmijum(II)-sulfid	$\text{CdS} \leftrightarrow \text{Cd}^{2+} + \text{S}^{2-}$	28
Hrom(III)-hidroksid	$\text{Cr}(\text{OH})_3 \leftrightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{OH}^-$	30,2
Bakar(II)-hidroksid	$\text{Cu}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^-$	19,66
Bakar(II)-sulfid	$\text{CuS} \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{S}^{2-}$	35,2
Gvožđe(II)-hidroksid	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	14,66
Gvožđe(II)-sulfid	$\text{FeS} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{S}^{2-}$	17,2
Olovo(II)-hidroksid	$\text{Pb}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{OH}^-$	14,93
Olovo(II)-sulfid	$\text{PbS} \leftrightarrow \text{Pb}^{2+} + \text{S}^{2-}$	28,15
Živa(II)-hidroksid	$\text{Hg}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Hg}^{2+} + 2\text{OH}^-$	23
Živa(II)-sulfid	$\text{HgS} \leftrightarrow \text{Hg}^{2+} + \text{S}^{2-}$	52
Nikal(II)-hidroksid	$\text{Ni}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^-$	15
Nikal(II)-sulfid	$\text{NiS} \leftrightarrow \text{Ni}^{2+} + \text{S}^{2-}$	24
Srebro(I)-hidroksid	$\text{AgOH} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{OH}^-$	14,93
Srebro(I)-sulfid	$(\text{Ag})_2\text{S} \leftrightarrow 2\text{Ag}^+ + \text{S}^{2-}$	28,15
Cink(II)-hidroksid	$\text{Zn}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^-$	16,7
Cink(II)-sulfid	$\text{ZnS} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{S}^{2-}$	22,8

3.3. Podešavanje pH -vrednosti

Podešavanje vrednosti pH je najčešći tehnološki proces koji prati druge operacije i procese u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda, a samo u retkim slučajevima, kod nekih industrijskih otpadnih voda, to može biti jedini vid tretmana pre ispštanja u vodoprijemnik ili gradsku kanalizacionu mrežu. U većini slučajeva, efikasnost određenog procesa zavisi od vrednosti pH , pa je njegovo održavanje ili podešavanje na željenom nivou od velike važnosti, ali isto tako značajno utiče i na očuvanje potrebnih uslova u samoj vodi, u smislu čuvanja delova opreme ili samih bazena i kanala u kojima se vrši tretman otpadne vode. Na primer, povećanje kiselosti otpadne vode može razarati beton od koga su napravljeni bazeni, a sa druge strane, bazna sredina može potpuno zaustaviti biološke procese koji se primenjuju u tretmanu. Istovremeno, regulacija pH -vrednosti direktno utiče i na stvaranje „kamenca“ u postrojenjima, kao i na povećanje korozije koja utiče na radni vek postrojenja.

Tokom samog tretmana otpadne vode može doći do promene njene pH -vrednosti, pa nezavisno da li je sa previše niskim ili visokim pH , mora se izvršiti njena neutralizacija pre odlaganja u prirodni recipijent.

Neutralizacija otpadnih voda je značajna, često neophodna faza obrade. Zahteva ulaganja, obzirom na utrošak sredstava za neutralizaciju, pa je zato treba vršiti na najekonomičniji način tj. jeftino a efikasno.

Ova faza obrade otpadnih voda je potrebna iz sledećih razloga:

- 1) Ako voda sadrži samo visoku koncentraciju H^+ ili OH^- jona, neutralizacija je i jedina faza obrade, a istovremeno i nužna jer su granice pH vrednosti za otpadne vode koje se ispuštaju u prirodne recipijente zakonom određene.
- 2) Ako su u vodi prisutni i drugi zagadjivači, neutralizacijom je neophodno podesiti pH -vrednost jer od nje direktno zavisi mogućnost njihovog uklanjanja (hemijskom ili fizičko-hemijskom obradom).
- 3) Kod otpadnih voda koje se obrađuju biološkim postupcima, neutralizacijom se ostvaruju optimalni uslovi za aktivnost mikroorganizama. Biološki postupci su u mnogome tolerantniji na promenu pH vrednosti od hemijskih i fizičko-hemijskih

postupaka. Ipak, pri aerobnoj obradi pH se mora kretati u opsegu od 6 do 8, a tolerantne granice su najviše 5 do 9.

Prema vrsti upotrebljenog neutralizacionog sredstva, mogu se primeniti sledeći postupci:

- 1) neutralizacija mešanjem kiselih i alkalnih otpadnih voda
- 2) neutralizacija krečom, krečnjakom ili krečnim mlekom
- 3) neutralizacija ugljen-dioksidom ili dimnim gasovima
- 4) neutralizacija jakim bazama ili kiselinama
- 5) neutralizacija jonskom izmenom i drugi.

U cilju smanjenja kiselosti otpadne vode, može se upotrebiti natrijum-hidroksid, „kaustična soda“, kao i natrijum-karbonat, poznat kao „soda“. Iako su ove hemikalije prilično skupe, podesne su i često se koriste u postrojenjima za tretman otpadnih voda manjih kapaciteta. Uprkos tome što je manje podesan za upotrebu, kao daleko najjeftiniji, kreč je najviše korišćena hemikalija za neutralizaciju kiselih otpadnih voda. Kao komercijalni proizvod može se sresti pod nazivima „brzi-kreč“ ili dehidratirani, „dolomitni kreč“ u više različitih oblika i drugi. Ovi agensi se razlikuju po čistoći i sadržaju CaO i svi se koriste u praškastom obliku, a nakon mešanja sa vodom prave tzv. „krečno mleko“. Krečnjak i krečni dolomiti su jeftiniji, ali manje podesni za korišćenje, pa mogu i da uspore reakciju neutralizacije. Njihovo korišćenje je ograničeno jer su u njima često prisutne grudvice slepljenog praškastog materijala, koje se ne mogu potpuno dispergovati u vodi, pa mogu praviti problem u daljem postupanju sa krečnim mlekom. U toku tretmana otpadnih voda, ove grudvice postaju jezgra oko kojih se taloži, tokom reakcije, formirani kalcijum-karbonat, koji počinje da sprečava kontakt kreča, $Ca(OH)_2$, iz središta zrna, sa ostatkom rastvora koji bi trebalo da se neutrališe.

Alkalne otpadne vode su manje „problematične“ za tretman od kiselih. Najprihvatljivije rešenje za neutralizaciju alkalne otpadne vode je njeno spajanje sa tokom kisele otpadne vode. Međutim, ako to nije moguće, najčešće se koristi sumporna kiselina.

U zavisnosti od pH-vrednosti, može doći do promene karbonatno-dikarbonatne ravnoteže u sistemu, što izaziva pojavu taloženja „kamenca“ u reaktorima i uređajima koji se koriste za tretman otpadne vode.

Tendencija razvijanja kalcijum-karbonatnih slojeva, zavisno od primenjenog tretmana, može se aproksimativno izračunati preko Langelierovog (*Langelier*) saturacionog indeksa (*LSI*):

$$LSI = pH - pHs \quad 3.32$$

pH merena *pH* u uzorku vode

pHs *pH* zasićenja kalcijum karbonatom

Kriterijumi tvrdoće za *LSI* su:

$LSI > 0$ Voda je prezasićena kalcijum-karbonatom i može doći do stvaranja naslaga.

$LSI < 0$ Voda je nezasićena kalcijum-karbonatom i ima tendenciju skidanja postojećeg zaštitnog sloja $CaCO_3$ u cevima i opremi.

$LSI = 0$ Voda je neutralna, ne stvara i ne skida naslage kamenca.

Treba naglasiti da se nezasićene vode ponekad definišu kao korozivne, što nije ispravno. Korišćenjem *LSI* indeksa je najpouzdanije definisati moguće prisustvo ili odsustvo kalcijum karbonatnih naslaga u vodi.

U industriji se primenjuje alternativni, indeks stabilnosti, odnosno indeks stepena agresivnosti vode, koji je predložen od strane Riznera (*Ryzner*), (*RI*):

$$RI = 2pHs - pH \quad 3.33$$

pH merena *pH* u uzorku vode

pHs *pH* zasićenja kalcijum karbonatom

Kriterijumi za stvaranje kamenca i agresivnosti vode za *RI* indeks su sledeći:

$RI < 5,5$	Nastaće velike naslage kamenca.
$5,5 < RI < 6,2$	Nastaće kamenac u određenoj količini.
$6,2 < RI < 6,8$	Nema smetnji.
$6,8 < RI < 8,5$	Voda je hemijski agresivna i izaziva koroziju.
$RI > 8,5$	Voda je vrlo hemijski agresivna.

Vrednost pH_s zasićenja može se izračunati korišćenjem sledećeg izraza:

$$pH_s = \frac{-\log\left\{K_{a2} \cdot \gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]\right\}}{K_{sp}} \quad 3.34$$

K_{a2}	ravnotežna konstanta za disocijaciju bikarbonata, $HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}$
$\gamma_{Ca^{2+}}$	koeficijent aktivnosti za kalcijum-jone
$[Ca^{2+}]$	koncentracija kalcijuma, mol/dm^3
$\gamma_{HCO_3^-}$	koeficijent aktivnosti za bikarbonat-jone
$[HCO_3^-]$	koncentracija bikarbonata, mol/dm^3
K_{sp}	proizvoda rastvorljivosti za $CaCO_3$

Koeficijent aktivnosti se može izračunati korišćenjem jednačine:

$$\log \gamma = -\frac{0,5Z_i^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad 3.35$$

a jonska jačina, korišćenjem jednačine:

$$I = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot TDS \quad 3.36$$

Z	naelektrisanje jonskih vrsta
I	jonska jačina
TDS	ukupna koncentracija rastvorenih soli u vodi

Vrednost pH_s zasićenja, u opsegu pH od 6,5 do 9,0 izračunava se po jednačini:

$$pH_s = pK_{a2} - pK_{sp} + p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] - \log \gamma_{Ca^{2+}} - \log \gamma_{HCO_3^-} \quad 3.37$$

pK_{a2}	negativni logaritam konstante disocijacije bikarbonat-jona
pK_{sp}	negativni logaritam proizvoda rastvorljivosti kalcijum karbonata
$p[Ca^{2+}]$	negativan logaritam koncentracije kalcijum-jona
$p[HCO_3^-]$	negativan logaritam koncentracije bikarbonat.jona

Vrednosti K_{a1} , K_{a2} i K_{sp} dati su u tabeli 3.5, kao funkcija temperature.

Tabela 3.5. Ravnotežne konstante disocijacije karbonata kao funkcija temperature

Temperatura °C	Ravnotežna konstanta		
	$K_{a1} \cdot 10^7$	$K_{a2} \cdot 10^{11}$	$K_{sp} \cdot 10^9$
5	3,020	2,754	8,128
10	3,467	3,236	7,080
15	3,802	3,715	6,02
20	4,169	4,169	5,248
25	4,467	4,477	4,571
40	5,012	6,026	3,090

3.4. Oksidacija

Oksidacija se često koristi pri obradi i prečišćavanju otpadnih ili prirodnih voda za prevođenje i modifikaciju nepoželjnih hemijskih vrsta u manje nepoželjne i manje toksične hemijske vrste. U ovom postupku, vrlo često nije neophodno izvršiti potpunu oksidaciju. Razlog za ovo je, što su u nekim slučajevima produkti potpune oksidacije više toksični nego intermedijerna jedinjenja. Naime, za potpunu oksidaciju velikog broja jedinjenja, vrlo često su potrebni bazeni i reaktori velikih kapaciteta, skupi katalizatori, a i vreme za potpunu oksidaciju vrlo često je dugo. Iz svih tih razloga, potrebno je dobro poznavati hemizam same oksidacije, kao i sve potrebne parametre i uslove koji moraju biti ispunjeni, kako bi se adekvatnom analizom došlo do optimizacije procesa u svakom pogledu.

U hemijskoj oksidaciji otpadnih voda je neophodno prvo odrediti koje nepoželjne supstance u vodi treba modifikovati ili potpuno ukloniti. Najčešće su to:

- neorganski joni (Mn^{2+} , Fe^{2+} , S^{2-} , CN^- , SO_3^{2-} , itd.) i
- organske materije (fenoli, amini, huminske kiseline i mnoga druga jedinjenja koja su toksična ili koja vodi daju drugačiji miris ili stvaraju uslove za rast bakterija ili stvaranje algi).

Hemijska oksidacija u tretmanu otpadnih voda obuhvata korišćenje oksidacionih agenasa, kao što su: ozon (O_3), vodonik-peroksid (H_2O_2), kalijum-permanganat ($KMnO_4$), hlor-dioksid (ClO_2), hlor (Cl_2), ili hipohlorasta kiselina ($HOCl$) i kiseonik (O_2). Proces oksidacije u tretmanu otpadnih voda posebno se koristi u smanjenju *BOD* i *COD*, kao i za oksidaciju amonijaka i bionerazgradivih organskih jedinjenja. U novije vreme, sve više se koriste tzv. napredni oksidacioni proces (*AOPs* - *advanced oxidation processes*) u kojima se koristi slobodni hidroksil-radikal (HO^*), kao jak oksidacioni agens za razgradnju specifičnih organskih komponenata i jedinjenja koja se na mogu oksidovati konvencionalnim oksidansima.

Za razumevanje oksidacionih procesa, neophodno je poznavati:

- oksido-redukcione reakcije,
- standardne redukcione potencijale,
- konstante ravoteže za redoks reakcije i

- brzine redoks reakcija.

Količine upotrebljenih hemikalija i njihova namena u pojedinim procesima je data u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Tipične doze hemikalija za oksidaciju organskih materija u otpadnoj vodi

Hemikalija	Upotreba	Doze <i>kg/kg</i> razgrađene materije	
		opseg	najčešća doza
Hlor	Smanjenje <i>BOD</i>		
	otpadna voda nakon taloženja sekundarni efluent	0,5-2,5	1,75
Ozon	Smanjenje <i>COD</i>		
	otpadna voda nakon taloženja sekundarni efluent	2,0-4,0 3,0-8,0	3,0 6,0

Iz prikazanih podataka, zapaža se da se doze upotrebljenih hemikalija povećavaju sa stepenom tretmana, što je razumljivo kad se uzme u obzir da su organske komponente koje zaostaju posle biološkog tretmana obično sačinjene od polarnih organskih molekula male molekulske mase i složenih struktura. Zbog složenosti procesa oksidacije potrebnu dozu oksidacionog sredstva je najsigurnije odrediti na osnovu pilot istraživanja, kojima bi se ocenila efikasnost zahtevanih doza. Primena *AOPs*, uključuje više od jednog oksidacionog agensa, na primer kombinaciju O_3/H_2O_2 .

Svaka redoks reakcija sastavljena je od dve polu-reakcije oksidacije i redukcije.

Da li će u vodi doći do odigravanja neke redoks reakcije zavisi od vrednosti elektromotorne sile, EMS . Kada je $EMS > 0$, onda je određena reakcija moguća. Vrednost elektromotorne sile se izračunava sledećom jednačinom:

$$EMS = E^{\circ}_{redukcije} - E^{\circ}_{oksidacije} \quad 3.38$$

EMS elektromotorna sila
 $E^{\circ}_{redukcije}$ potencijal redukcione polureakcije
 $E^{\circ}_{oksidacije}$ potencijal oksidacione polureakcije

Primer polu-reakcije redukcije su dati u tabeli 3.7 za najčešće korišćena oksidaciona sredstva, kao i vrednosti standardnih oksidacionih elektrodnih potencijala u tabeli 3.8.

Tabela 3.7. Standardni redukcionni elektrodni potencijal za najčešće korišćena oksidaciona sredstva

Oksidacioni agens	Polureakcija redukcije	Standardni redukcionni potencijal, V
Ozon	$O_3 + 2e^- \leftrightarrow O_2 + H_2O$	+2,07
Vodonik peroksid	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow 2H_2O$	+1,78
Permanganat	$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- \leftrightarrow MnO_2 + 2H_2O$	+1,67
Hlor dioksid	$ClO_2 + e^- \leftrightarrow ClO_2^-$	+1,50
Hipohlorna kiselina	$HOCl + H^+ + 2e^- \leftrightarrow Cl^- + H_2O$	+1,49
Hipojodna kiselina	$HOI + H^+ + e^- \leftrightarrow 1/2I_2 + H_2O$	+1,45
Gasni hlor	$Cl_2 + 2e^- \leftrightarrow Cl^-$	+1,36
Kiseonik	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O$	+1,23
Brom	$Br_2 + 2e^- \leftrightarrow Br^-$	+1,09
Hipohlorit	$OCl^- + H_2O + 2e^- \leftrightarrow Cl^- + 2OH^-$	+0,90
Hlorit	$ClO_2^- + 2H_2O + 4e^- \leftrightarrow Cl^- + 4OH^-$	+0,76
Jod	$I_2 + 2e^- \leftrightarrow 2I^-$	+0,56

Tabela 3.8. Odabrani standardni oksidacioni elektrodni potencijali

Polu-reakcija	Oksidacioni potencijal, V (Ove vrednosti treba uzeti kao red veličine, a ne kao apsolutne, uvek ponovljive, vrednosti)
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3,03
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,92
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	-1,51
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0,828
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,400
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S}$	-0,140
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$	+0,150
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,799
$\text{F}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{HF}$	+2,870

Konstanta ravnoteže i elektromotorne sile su međusobno povezane izrazom:

$$\ln K = \frac{nF(EMS)}{RT} \quad 3.39$$

- K konstanta ravnoteže
 n broj razmenjenih elektrona
 F Faradejeva konstanta, 96,485 C/g eq
 R Univerzalna gasna konstanta, 8,3144 J/mol · K
 T temperatura, K

Na primer, na 25°C:

$$\log K = \frac{n \cdot 96,485 \cdot EMS}{2,303 \cdot 8,3144 \cdot (273,15 + 25)} = \frac{n \cdot EMS}{0,0592} \quad 3.40$$

Korišćenjem ove jednačine, može se dobiti vrednost konstante koja nam govori u kom odnosu bi morale da nam budu koncentracije reaktanata i proizvoda da bi se redoks reakcija odigrala.

$$K = \frac{[\text{proizvod reakcije}]}{[\text{reaktant 1}][\text{reaktant 2}]} \quad 3.41$$

Od oksidacionih procesa koji se primenjuju u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda, najvažniji su:

- hemijska oksidacija biorazgradivog organskog zagađenja *BOD*,
- hemijska oksidacija bionerazgradivih organskih i prisutnih neorganskih komponenti i
- hemijska oksidacija amonijaka.

U praksi se za uklanjanje *BOD* daleko više primenjuju biološki postupci, dok se za specifična nebiodegradabilna zagađenja najčešće koriste napredni oksidacioni procesi.

Poseban problem u tretmanu otpadnih voda predstavlja amonijak, pošto je po pravilu prisutan u otpadnoj vodi. Uklanjanje amonijaka danas se najčešće i ekonomski najopravdanije vrši biološkim postupcima. Međutim, u slučajevima kada sam biološki postupak, usled pojave povišenih zagađenja na ulazu u postrojenje, nije u stanju da prečisti sav prisutan amonijak, na izlazu iz postrojenja je potrebno primeniti hemijsku oksidaciju, kako bi efluent zadovoljio zakonom predviđene maksimalne dozvoljene koncentracije pre njegovog ispuštanja u vodoprijemnik.

Iako se za oksidaciju amonijaka mogu koristiti različita oksidaciona sredstva, u praksi se najčešće koristi hlor.

Hemijski proces u kojima se hlor koristi za oksidaciju amonijaka do elementarnog azota poznat je kao hlorisanje preko prelomne tačke.

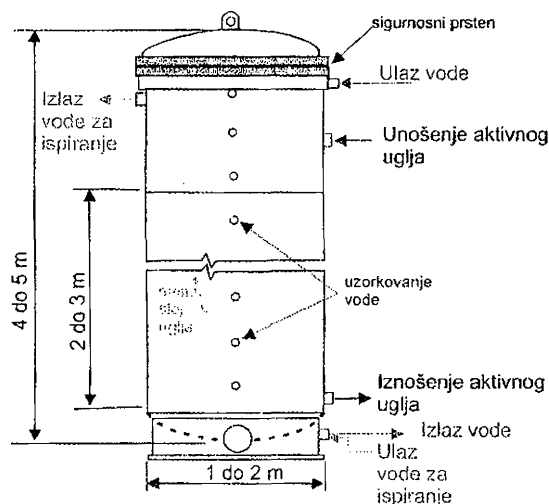
Inače ovaj proces ima širu primenu u pripremi vode za piće, kada se radi o izvoristu sa povećanom koncentracijom amonijaka, koju nije moguće ukloniti samo biološkim tretmanom na peščanom filtru. Najvažniji efekat ovog procesa je što se, uz odgovarajuću kontrolu, može oksidisati celokupna količina prisutnog amonijaka.

3.5. Adsorpcija

Adsorpcija je vrlo čest, a u nekim slučajevima i nezamenljiv postupak izdvajanja organskih supstanci iz vode. Može se definisati kao proces migracije i akumulacije određene supstance iz jedne u drugu fazu. Proces adsorpcije se uvek odigrava na međufaznoj površini. To je, u suštini, površinski fenomen uslovljen razlikom liofilnosti ili liofobnosti rastvorene supstance u odnosu na rastvarač.

U procesu adsorpcije učestvuju Kulonove (*Coulone*) i Vandervalsove (*Van der Waals*) sile, a dominantna sila zavisi od hemijske prirode sistema.

Sam proces se odvija tako što se na izrazito velikoj kontaktnoj površini adsorbensa, koja se obezbeđuje velikom poroznošću i mnoštvom manjih i većih kanala unutar definisane zapremine, zadržavaju rastvorene supstance i na taj način izdvajaju iz vode. Adsorpciona kolona sa aktivnim ugljem je šematski prikazana na slici 3.10.



Slika 3.10. Adsorpciona kolona

Adsorpcioni kapacitet se može odrediti kao veza između mase adsorbovane faze u odnosu na masu adsorbensa, x/m i koncentracije adsorbata koji je ostao u tečnoj fazi, C , u stanju ravnoteže, za datu temperaturu.

Na određenoj temperaturi se uspostavlja ravnoteža između koncentracije adsorbata u rastvoru i onog koji je vezan za određenu masu adsorbensa, a grafički prikaz te relacije naziva se *adsorpciona izoterma*. U literaturi se najčešće sreću linearna, Frojndlihova (*Freundlich*) i Lengmirova (*Langmuire*) izoterma.

Primena linearne izoterme je ograničena samo na male koncentracije rastvorenih komponenti u vodi i ima oblik:

$$\frac{x}{m} = K[C] \quad 3.42$$

$\frac{x}{m}$ odnos mase adsorbata i mase adsorbensa
 K linearni koeficijent
 C koncentracija adsorbata u rastvoru

Ova izoterma se najčešće primenjuje kod apsorpcije gasova u tečnosti, pa se tada naziva i Henrijeva (*Henry*) izoterma.

Krive koje opisuju adsorpcionu ravnotežu mogu se izraziti matematički:

Frojndlihovom, empirijskom, izotermom,

$$\frac{x}{m} = k[C]^{1/n} \quad 3.43$$

i Langmirovom, teorijskom, adsorpcionom izotermom:

$$\frac{x}{m} = \frac{ab[C]}{1+b[C]} \quad 3.44$$

k Frojndlihova konstanta
 C koncentracija adsorbata u rastvoru
 n Frojndlihov eksponent
 a, b Lengmirove konstante

Ukoliko se i jedna i druga izoterma, jednačine 3.43 i 3.44, napišu u linearizovanom obliku, dobijaju se respektivno izrazi, za Frojndlihovu izotermu:

$$\ln \frac{x}{m} = \ln k + \frac{1}{n} \ln [C] \quad 3.45$$

i Langmirovu izotermu:

$$\frac{[C]}{\frac{x}{m}} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} [C] \quad 3.46$$

Da bi se ove jednačine koristile, neophodno je odrediti vrednosti konstanti. Za Frojndlihovu izotermu traženi parovi vrednosti, na osnovu kojih je moguće odrediti nagib i odsečak su $\ln(x/m)$ i $\ln[C]$, dok za Langmirovu adsorpcionu izotermu taj par parametara je $[C]/(x/m)$ i $[C]$.

Glavni zadatak kod adsorpcije se svodi na određivanje adsorpcionog kapaciteta aktivnog uglja, odnosno koja je količina aktivnog uglja potrebna za uklanjanje određene količine posmatranih zagađujućih materija u otpadnoj vodi.

3.6. Aeracija

U tretmanu otpadnih voda pojam aeracija može biti upotrebljen za operaciju uvođenja gasovite faze (vazduha ili kiseonika) u tečnu fazu, u cilju prenosa mase kiseonika u otpadnu vodu, ili za operaciju uklanjanja gasovite faze iz tečne, odnosno za uklanjanje gasovitih sastojaka CO_2 , N_2 , H_2S , CH_4 , NH_3 i brojnih isparljivih organskih jedinjenja koja su prisutna u otpadnoj vodi. Prisustvo kiseonika u otpadnoj vodi je veoma važno pogotovo za biološku obradu otpadnih voda. Na prenos mase kiseonika u vodu utiču temperatura i pritisak na kome se proces aeracije odvija, prisutne zagađujuće materije u otpadnoj vodi kao i geometrija sistema u kome se aeracija izvodi.

Rastvorljivost je fizička veličina koja se izražava koncentracijom rastvorenog kiseonika u vodi i opisuje se pomoću Henrijevog zakona (*Henry*):

$$C = \frac{p_g}{H_e(T)} = \frac{y_{O_2} P}{H_e(T)} \quad 3.47$$

C koncentracija rastvorenog kiseonika u vodi, kg/m^3

p_g parcijalni pritisak, Pa

H_e Henrijeva konstanta koja se menja u funkciji od temperature T ,
 $atm \cdot m^3/kg$

y_{O_2} zapreminski udeo kiseonika u vazduhu, m^3/m^3

P pritisak, atm

Za sistem čist kiseonik-voda i vazduh-voda, u tabeli 3.9, data je zavisnost rastvorljivosti kiseonika u vodi u funkciji od temperature, gde pritisak kiseonika iznosi 1 bar u oba slučaja. (Manja vrednost rastvorljivosti kiseonika iz vazduha je posledica manjeg parcijalnog pritiska kiseonika u smeši sa ostalim gasovima u vazduhu u odnosu na čist kiseonik.)

Ako se pretpostavi čista fizička apsorpcija kiseonika u vodi u šaržnom reaktoru i idealno izmešana tečnost, onda je, na osnovu bilansa mase kiseonika za tečnu fazu, brzina prenosa mase kiseonika jednaka:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad 3.48$$

C_s koncentracija rastvorenog kiseonika koja je u ravnoteži sa
 parcijalnim pritiskom kiseonika u gasnoj fazi, tj. koncentracija
 zasićenja pri određenim uslovima, mg/L

$k_L a$ zapreminski koeficijent prenosa mase kiseonika, h^{-1}

Vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase kiseonika zavisi od
 temperature na kojoj se proces aeracije izvodi, pa je, ako je poznata
 vrednost na jednoj, primenom Hof-Arenijusove (*Hoff-Arrhenius*)
 korelacije, koja uzima kao referentnu temperaturu od 20 °C, moguće
 izračunati njegovu vrednost na drugoj temperaturi:

$$k_{L,a}(T) = k_{L,a}(20^{\circ}C) \theta^{T-20} \quad 3.49$$

odnosno, kada se traži vrednost na 20 °C, onda je:

$$k_{L,a}(20^{\circ}C) = k_{L,a}(T) \theta^{20-T} \quad 3.50$$

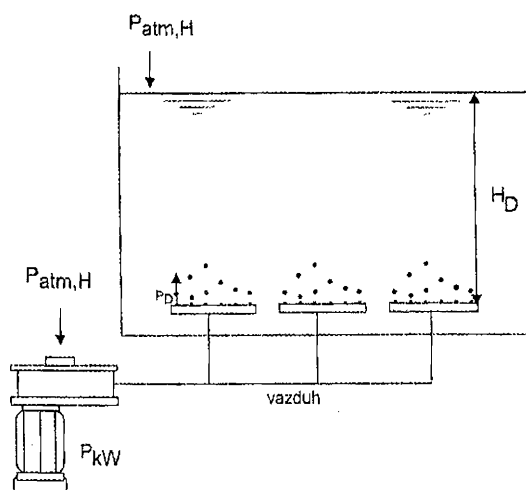
θ temperaturni korekcionni faktor i za otpadnu vodu njegova vrednost
 se najčešće uzima kao 1,024

T temperatura, °C

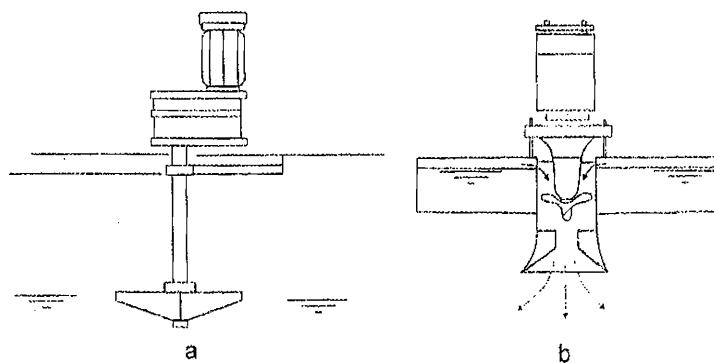
Tabela 3.9. Zavisnost rastvorljivosti kiseonika u vodi od temperature

T °C	Pritisak čistog kiseonika 1 bar		Pritisak vazduha 1 bar
	Rastvorljivost čistog kiseonika kg/m^3	Henrijeva konstanta $atm \cdot m^3/kg$	Rastvorljivost kiseonika iz vazduha kg/m^3
0	0,0703	14,2	0,0148
10	0,0549	18,2	0,0115
15	0,0495	20,2	0,0104
20	0,0450	22,2	0,0095
25	0,0414	24,2	0,0087
30	0,0384	26,1	0,0081
35	0,0358	27,9	0,0075
40	0,0337	29,7	0,0071

U praksi, proces aeracije se najčešće izvodi primenom difuznih i mehaničkih aeratora. U prvom slučaju, slika 3.11., vazduh se distribuira kroz difuzere postavljene neposredno iznad dna aeracionog bazena, dok se kod mehaničke aeracije, slika 3.12, koriste mešači na površini vode aeratora, koji snažnom turbulencijom povećavaju kontaktnu površinu između vode i vazduha i na taj način obezbeđuju rastvaranje kiseonika u vodi.



Slika 3.11. Aeracioni bazen sa difuznom aeracijom



Slika 3.12. Mehanički aeratori: a) spori mešači, b) brzi mešači

Bez obzira na to na koji način se aeracija vrši, neophodno je uvek imati na umu da će, pre svega, uslovi pod kojima se aeracija vrši uticati na efikasnost prenosa kiseonika iz vazduha u vodu. Proizvođači opreme daju podatke o osnovnim parametrima uređaja dobijenih na standardnim uslovima ispitivanja. Međutim, za slučajeve njihove primene u realnim uslovima za aerisanje otpadne vode potrebno je definisati radne parametre, a to se može učiniti primenom sledeće korelacije:

$$N = N_0 \left(\frac{\beta C_{\bar{s},T,H} - C_L}{C_{s,20}} \right) (1,024^{T-20}) (\alpha)(F) \quad 3.51$$

- N stvarna brzina prenosa mase kiseonika na radnim uslovima, $kg\ O_2/h$
 N_0 brzina prenosa mase kiseonika u čistoj vodi pri standardnim uslovima na $20^\circ C$ i pri koncentraciji $0\ mg/L$ rastvorenog kiseonika, (daje je proizvođač uređaja), $kg\ O_2/h$
 β korekcionni faktor koji pokazuje uticaj rastvorenih i suspendovanih materija u otpadnoj vodi na prenos mase kiseonika u otpadnu vodu (salinitet, suspendovane čestice, površinski aktivne materije) uobičajna vrednost je $0,70 - 0,98$ ali se najčešće koristi $0,95$
 $C_{\bar{s},T,H}$ srednja vrednost koncentracije zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi u aeracionom bazenu na temperaturi T i nadmorskoj visini H , mg/L
 C_L koncentracija kiseonika za radne uslove, uobičajena vrednost $2\ mg/L$
 $C_{s,20}$ koncentracija kiseonika pri zasićenju za $20^\circ C$, mg/L
 T temperatura za radne uslove, $^\circ C$
 α korekcionni faktor koji se odnosi na uticaj geometrije i stepena mešanja na prenos mase kiseonika u otpadnoj vodi, $0,8 - 0,9$

$$\alpha = \frac{(k_L a)_{otpadna\ voda}}{(k_L a)_{čista\ voda}} \quad 3.52$$

- F faktor zaprljanosti, kod difuzera se obično kreće u granicama $0,65 - 0,90$, kod mahaničkih aeratora ovaj faktor se ne uračunava

Određivanje srednje vrednosti koncentracije zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi u aeracionom bazenu na temperaturi T i visini H , $C_{\bar{s},T,H}$ se radi tako što se uključi uticaj pritiska usled nadmorske visine i

efikasnosti prenosa mase kiseonika u vodu, u odnosu na maksimalno moguću koncentraciju kiseonika pri radnoj temperaturi, koju bi aeracijom moglo ostvariti pri samoj površini vode. Ovako izračunata vrednost predstavlja srednju koncentraciju kiseonika u vodi koja bi se mogla ostvariti tokom aeracije. Ona uzima u obzir i činjenicu da će tokom same aeracije doći do potrošnje kiseonika od strane prisutnih mikroorganizama u vodi, a što se reflektuje kroz udeo prenete količine kiseonika u vodu. Na taj način je:

$$C_{\bar{s},T,H} = (C_{s,T,H}) \frac{1}{2} \left(\frac{P}{P_{atm,H}} + \frac{O_t}{21} \right) \quad 3.53$$

$C_{s,T,H}$ koncentracija zasićenja kiseonika u čistoj vodi na temperaturi T i visini H , mg/L

P pritisak na izlazu iz difuzera (zbir hidrostatičkog pritiska iznad difuzera i atmosferskog pritiska na koti postrojenja $P_D = P_{H_D} + P_{atm}$), koji vazduh mora savladati pri izlazu iz difuzera, Pa . Kod mehaničkih aeratora ovo je atmosferski pritisak, P_{atm} .

O_e sadržaj kiseonika u izlaznoj struji vazduha koja napušta vodu nakon aeracije, izražena u procentima, %

Ukoliko nema mikrobioloških procesa u sistemu, onda se ova vrednost koncentracije kiseonika, može izračunati po jednačini:

$$C_{\bar{s},T,H} = (C_{s,T,H}) \left(\frac{P_{atm,H} + P_{H_D}/2}{P_{atm,H}} \right) \quad 3.54$$

$P_{H_D}/2$ vrednost hidrostatičkog pritiska na polovini dubine bazena između difuzera i površine bazena, izražena u odgovarajućim jedinicama. Kod mehaničkih aeratora ovaj parametar se ne uzima u obzir.

Koncentracija zasićenja kiseonika u čistoj vodi na temperaturi T i visini H , $C_{s,T,H}$ se računa u odnosu na koncentraciju zasićenja kiseonika u čistoj vodi na temperaturi T i nultoj nadmorskoj visini $H = 0$, pa je uticaj promene pritiska sa promenom nadmorske visine, na koncentraciju zasićenja dat sledećom jednačinom:

$$C_{s,T,H} = C_{s,T,H=0} \cdot \frac{P_{atm,H}}{P_{atm,H=0}} \quad 3.55$$

Vrednost $C_{s,T,H=0}$ se daje kao tablična vrednost za određenu temperaturu T , tabela 3.10.

Sam odnos umanjenja atmosferskog pritiska sa visinom je dat jednačinom:

$$\frac{P_{atm,H}}{P_{atm,H=0}} = e^{-\frac{gM(H-0)}{RT}} \quad 3.56$$

odakle se može izračunati i vrednosti atmosferskog pritiska na određenoj visini H , na osnovu jednačine:

$$P_{atm,H} = P_{atm,H=0} \cdot e^{-\frac{gM(H-0)}{RT}} \quad 3.57$$

$P_{atm,H=0}$	pritisak na nultoj nadmorskoj visini, $1,01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
g	ubrzanje zemljine teže, $9,81 \text{ m/s}^2$
M	molekulska masa vazduha, $28,97 \text{ kg/kg} \cdot \text{mol}$
H	nadmorska visina postrojenja, m
R	univerzalna gasna konstanta, $8314 \text{ N} \cdot \text{m/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$
T	apsolutna temperatura, K

Promena vrednosti pritiska sa visinom data je u tabeli 3.11, a vrednosti fizičkih parametara vazduha u zavisnosti od temperature u tabeli 3.12.

Brzina prenosa mase kiseonika kod difuzne aeracije se može računati po empirijskoj korelaciji Ekenfeldera (*Eckenfelder*) i Forda (*Ford*), koja povezuje protok vazduha kroz difuzere sa brzinom prenosa mase kiseonika u otpadnu vodu, koja je data u obliku:

$$N_D = CQ^{1-n} H_D^{0,67} (C_m - C_L) \cdot 1,024^{(T-20)} \cdot \alpha \quad 3.58$$

N_D	brzina prenosa mase kiseonika u vodu, kg/h
C, n	konstante
Q	zapreminski protok vazduha, m^3/s
H_D	dubina vode do difuzera, m
α	korekcionni faktor, $\alpha = \frac{k_L a(\text{otpadna voda})}{k_L a(\text{čista voda})}$

- $k_L a$ zapreminski koeficijent prenosa mase
 C_m koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, na sredini visine, u radnim uslovima, mg/L
 C_L radna (željena) koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, mg/L

Koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, na sredini dubine iznad difuzera, u radnim uslovima, dobija se tako što se koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi pomnoži sa faktorom β , tj.:

$$C_m = \beta C_{\bar{s},T,H} \quad 3.59$$

Radi jednostavnosti, pri određivanju vrednosti koncentracije, C_m , moguće je napraviti međukorak, pa odmah uključiti korekciju faktorom β , tako što će se njime pomnožiti koncentracija zasićenja kiseonikom u čistoj vodi $C_{s,T,H}$, čime se uvodi nova veličina koja predstavlja koncentraciju zasićenja pri radnim uslovima na koju utiče hemijski sastav otpade vode, C_w , izražene u mg/L :

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} \quad 3.60$$

Potom se, u sledećem koraku, uvodi uticaj pritiska, dubine vode i fenomena prenosa mase kiseonika u otpadnu vodu i dobija koncentracija zasićenja na polovini dubine vode iznad difuzera u radnim uslovima, po jednačini:

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right) \quad 3.61$$

gde je pritisak iznad difuzera, P_D jednak:

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_0} \quad 3.62$$

Jasno je da će se u oba slučaja dobiti identičan rezultat za C_m , bilo da se primenom jednačine,

$$C_{\bar{s},T,H} = (C_{s,T,H}) \frac{1}{2} \left(\frac{P_D}{P_{atm,H}} + \frac{O_e}{21} \right) \quad 3.63$$

prvo odredi $C_{s,T,H}$ pa onda dobijena vrednost pomnožiti sa β ili se, sa uvođenjem vrednosti C_w , na početku, proračuna. Kako se u literaturi mogu naći oba pristupa to su ovde i navedena.

Potrebna snaga uređaja kojim se obezbeđuje difuziona aeracija, računa se po jednačini:

$$P_{kw} = \frac{mRT_0}{8,41e} \left[\left(\frac{P_D}{P_{atm,H}} \right)^{0,283} - 1 \right] \quad 3.64$$

- P_{kw} snaga uređaja za transport vazduha, kW
- m maseni protok vazduha, kg/s
- R gasna konstanta, $8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot K$
- T_0 ulazna temperatura
- P_D izlazni pritisak, kPa
- $P_{atm,H}$ ulazni pritisak, kPa
- e efikasnost uređaja

Kod mehaničke aeracije, princip izračunavanja brzine prenosa mase kiseonika je identičan sa onim kod difuzione, stići što se ne uzima uticaj stepena zaprljanosti F , koji se odnosio na difuzere, pa jednačina ima sledeći oblik:

$$N_M = N_{O_M} \left(\frac{C_w - C_L}{C_{s,20}} \right) 1,024^{T-20} \alpha \quad 3.65$$

- N_M brzina prenosa kiseonika u radnim uslovima, $kg \text{ O}_2/kW \cdot h$
- N_{O_M} brzina prenosa kiseonika u čistoj vodi na $20^\circ C$ sa $0,0 \text{ mg/L}$ rastvorenog kiseonika, $kg \text{ O}_2/kW \cdot h$
- C_L radna koncentracija kiseonika, mg/L
- $C_{s,20}$ koncentracija zasićenja kiseonika na $20^\circ C$
- C_w koncentracija zasićenja kiseonika u otpadnoj vodi pri radnim uslovima, mg/L

Tabela 3.10. Koncentracija rastvorenog kiseonika u vodi u funkciji od temperature i barometarskog pritiska (salinitet=0 ppt)

Koncentracija ratvorenog kiseonika,mg/L										
Tempe- ratura °C	Barometarski pritisak, mmHg									
	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0	14,12	14,22	14,31	14,41	14,51	14,60	14,70	14,80	14,89	14,99
1	13,73	13,82	13,92	14,01	14,10	14,20	14,29	14,39	14,48	14,57
2	13,36	13,45	13,54	13,63	13,72	13,81	13,90	14,00	14,09	14,18
3	13,00	13,09	13,18	13,27	13,36	13,45	13,53	13,62	13,71	13,80
4	12,66	12,75	12,83	12,92	13,01	13,09	13,18	13,27	13,35	13,44
5	12,33	12,42	12,50	12,59	12,67	12,76	12,84	12,93	13,01	13,10
6	12,02	12,11	12,19	12,27	12,35	12,44	12,52	12,60	12,68	12,77
7	11,72	11,80	11,89	11,97	12,05	12,13	12,21	12,29	12,37	12,45
8	11,44	11,52	11,60	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07	12,15
9	11,16	11,24	11,32	11,40	11,47	11,55	11,63	11,70	11,78	11,86
10	10,90	10,98	11,05	11,13	11,20	11,28	11,35	11,43	11,50	11,58
11	10,65	10,72	10,80	10,87	10,94	11,02	11,09	11,16	11,24	11,31
12	10,41	10,48	10,55	10,62	10,69	10,77	10,84	10,91	10,98	11,05
13	10,17	10,24	10,31	10,38	10,46	10,53	10,60	10,67	10,74	10,81
14	9,95	10,02	10,09	10,16	10,23	10,29	10,36	10,43	10,50	10,57
15	9,73	9,80	9,87	9,94	10,00	10,07	10,14	10,21	10,27	10,34
16	9,53	9,59	9,66	9,73	9,79	9,86	9,92	9,99	10,06	10,12
17	9,33	9,39	9,46	9,52	9,59	9,65	9,72	9,78	9,85	9,91
18	9,14	9,20	9,26	9,33	9,39	9,45	9,52	9,58	9,64	9,71
19	8,95	9,01	9,07	9,14	9,20	9,26	9,32	9,39	9,45	9,51
20	8,77	8,83	8,89	8,95	9,02	9,08	9,14	9,20	9,26	9,32
21	8,60	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,14
22	8,43	8,49	8,55	8,61	8,67	8,73	8,79	8,84	8,90	8,96
23	8,27	8,33	8,39	8,44	8,50	8,56	8,62	8,68	8,73	8,79
24	8,11	8,17	8,23	8,29	8,34	8,40	8,46	8,51	8,57	8,63
25	7,96	8,02	8,08	8,13	8,19	8,24	8,30	8,36	8,41	8,47
26	7,82	7,87	7,93	7,98	8,04	8,09	8,15	8,20	8,26	8,31
27	7,68	7,73	7,79	7,84	7,89	7,95	8,00	8,06	8,11	8,17
28	7,54	7,59	7,65	7,70	7,75	7,81	7,86	7,91	7,97	8,02
29	7,41	7,46	7,51	7,57	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,88
30	7,28	7,33	7,38	7,44	7,49	7,54	7,59	7,64	7,69	7,75
31	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46	7,51	7,56	7,62

32	7,04	7,09	7,14	7,19	7,24	7,29	7,34	7,39	7,44	7,49
33	6,92	6,97	7,02	7,07	7,12	7,17	7,22	7,27	7,31	7,36
34	6,80	6,85	6,90	6,95	7,00	7,05	7,10	7,15	7,20	7,24
35	6,69	6,74	6,79	6,84	6,89	6,93	6,98	7,03	7,08	7,13
36	6,59	6,63	6,68	6,73	6,78	6,82	6,87	6,92	6,97	7,01
37	6,48	6,53	6,57	6,62	6,67	6,72	6,76	6,81	6,86	6,90
38	6,38	6,43	6,47	6,52	6,56	6,61	6,66	6,70	6,75	6,80
39	6,28	6,33	6,37	6,42	6,46	6,51	6,56	6,60	6,65	6,69
40	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,46	6,50	6,55	6,59

Tabela 3.11. Atmosferski pritisak u zavisnosti od nadmorske visine

Nadmorska visina, <i>m</i>	Atmosferski pritisak, <i>mmHg</i>
0	760
304,8	733
609,6	706
914,4	680
1219,1	656
1523,9	632
1828,7	609
2133,5	586
2438,3	564
2743,1	543

Tabela 3.12. Gustina i specifična težina vazduha u zavisnosti od temperature

Temperatura (°C)	Gustina (<i>kg/m³</i>)	Specifična težina (<i>N/m³</i>)
-40	1,514	14,85
-20	1,395	13,68
0	1,293	12,67
5	1,269	12,45
10	1,247	12,23
20	1,204	11,81
25	1,184	11,61
30	1,165	11,43
40	1,127	11,05
50	1,109	10,88
60	1,060	10,40

Kod proračuna sistema za aeraciju potrebno je da se, na osnovu željene koncentracije rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi, odredi protok vazduha koji bi to obezbedio u zavisnosti od radnih uslova. Takođe, potrebno je odrediti i snagu uređaja za transport izračunate količine vazduha.

SEKUNDARNA OBRADA OTPADNIH VODA

Naziv sekundarni tretman je sinonim za biološko prečišćavanje otpadnih voda i time se jasno naznačava da se iz vode uklanja i organsko zagađenje. Biološko prečišćavanje se u tretmanu otpadnih voda široko primenjuje, jer se na ekonomičan način i sa dovoljnom efikasnošću iz vode mogu ukloniti organske zagađujuće materije. Ovaj vid prečišćavanja se izvodi nakon uklanjanja inertnog i drugog neorganskog zagađenja iz vode u primarnom tretmanu. Prema standardima koji su propisani za kvalitet efluenta nakon sekundarne obrade, otpadna voda ne bi trebalo da ima *BOD* iznad 20 mg/L , odnosno *TSS* iznad 30 mg/L , što su i prihvatljive vrednosti za većinu prirodnih recipijenata. Dobro isprojektovana i izvedena, a što je i najvažnije, dobro kontrolisana i regulisana sekundarna obrada, tokom eksploatacije, može obezbediti kvalitet sa definisanim, pa i boljim, granicama kvaliteta efluenta. Samo prečišćavanje se odvija pomoću živih mikroorganizama, pa je posao inženjera operatera na postrojenju da uspešno kontroliše parametre i obezbeđuje uslove za rad sistema i održavanje života u njemu. Nepoznavanje procesa, njegove kinetike, graničnih vrednosti fluido-mehaničkih i parametara životne sredine, onemogućava njegovo uspešno održavanje u funkcionalnim i operativnim granicama, što na kraju može dovesti i do prekida rada postrojenja. Upravo se ovde najviše i ogleda uloga inženjera tehnologije koji poznavanjem mehaničkih, hemijskih i bioloških procesa i njihove povezanosti u jednu celinu, mogu na najbolji način da održe ovakve sisteme u kontinualnom radu.

4. BIOLOŠKI TRETMAN OTPADNIH VODA

Proces biološkog prečišćavanja je zasnovan na aktivnosti kompleksne mikroflore prisutne u vodi, koja tokom svoje životne aktivnosti, koja podrazumeva održavanje života, rast, razmnožavanje i odumiranje, koristi znatan deo organskih i jedan manji deo neorganskih materija u otpadnoj vodi. Organska materija se u ovom procesu ne gubi, već se samo iz rastvorenog oblika transformiše u ćelijsku biomasu. Čelije mikroorganizama imaju svoj oblik i masu, pa se stoga i mogu tretirati kao čvrste čestice. One se nakon biološkog procesa, jednostavnim taloženjem izdvajaju iz vode, koja kao prečišćena odlazi na dalji tretman pre ispuštanja u recipijent, a izdvojena biomasa zadržava u sebi koncentrovanu organsku materiju. Tako dobijena biomasa se potom podvrgava naknadnoj obradi, kako bi se učinila bezopasnom po životnu sredinu i konačno odlaže u prirodu.

Način biološkog prečišćavanja otpadnih voda je „preuzet“ iz prirodnih procesa, koji se dešavaju tokom samoprečišćavanja vodotokova, u koje je uneto određeno zagađenje. Razlika je samo u tome, što su prirodni procesi sporiji, dok se u ovom slučaju oni ubrzavaju, obezbeđenjem povoljnih uslova za odvijanje procesa u bioreaktoru. Na ovaj način se, kontrolisanjem rasta i razmnožavanja mikroflore u otpadnoj vodi, uvode principi odvijanja procesa industrijske mikrobiologije. Međutim, u odnosu na industrijske procese, pri prečišćavanju otpadnih voda koristi se mikroflora koja potiče iz prirodne sredine i njihov rast se ne odvija pri optimalnim fiziološkim uslovima, jer, na primer, postrojenja za tretman otpadnih voda se grade na otvorenom, pa je time uticaj klimatskih uslova veoma izražen, što se kod industrijskih procesa ne dešava. Na taj način se može reći da su procesi biološkog prečišćavanja otpadnih voda zasnovani na stimulisanim i ubrzanim prirodnim procesima. Takođe, postoji još jedna značajna razlika u konačnom cilju, jer se kod industrijskih procesa obično teži što većem prinosu biomase ili proizvodnji ćelijskih metabolita, dok se kod prečišćavanja otpadnih voda proces vodi ka što većem uklanjanju organskih materija i odnos njihove

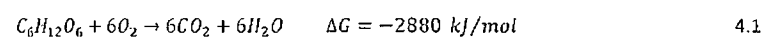
ulazne prema izlaznoj koncentraciji je osnovni parametar koji definiše efikasnost procesa.

Najčešća primena bioloških procesa u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda je kod uklanjanja organskog sadržaja i nutrijenata (azota i fosfora) iz otpadne vode. Takođe, često se primenjuju i za uklanjanje organskih frakcija muljeva koji nastaju tokom primarnog prečišćavanja (taloženja), kao i za razgradnju viška biomase nakon sekundarne obrade (mulj iz sekundarnog taložnika), što se zajednički naziva biološka stabilizacija muljeva ili digestija.

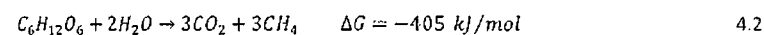
U svojoj osnovi, mikrobiloški procesi se odvijaju u prisustvu kiseonika (aerobni) i u odsustvu kiseonika (anaerobni procesi). Unutar tih granica mogu se odvijati i procesi koji se više ili manje približavaju navedenim graničnim uslovima.

Razlika ova dva osnovna procesa je u putevima biološke oksidacije organskih materija, što se može videti na primeru oksidacija glukoze, kao jednostavne organske materije.

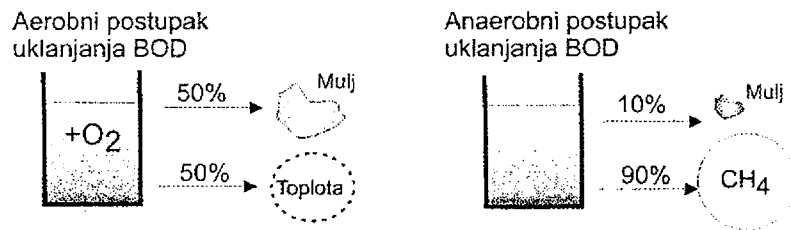
U aerobnim uslovima proces se odvija na sledeći način:



Anaerobnim postupkom nastaje:



Iz jednačina 4.1 i 4.2 se vidi da aerobni put oksidacije karakteriše produkcija veće količine slobodne energije ΔG . Ovo za posledicu ima brz i intenzivan rast biomase, a samim tim i brzu aktivnost ćelija, što omogućava brže prečišćavanje otpadne vode, nego što je to slučaj kod anaerobnih postupaka. Istovremeno, shodno principima održanja energije, kod anaerobnih procesa, stvara se metan, CH_4 , koji u sebi nosi energetska razliku između ova dva procesa. Takođe, produkti koji nastaju nakon ova dva procesa se razlikuju, pa je i količina biomase kod aerobnih procesa izraženija nego kod anaerobnih procesa, što je i predstavljeno na slici 4.1.



Slika 4.1. Poređenje aerobnog i anaerobnog procesa prečišćavanja otpadnih voda

Pri anaerobnom procesu, produkuje se malo slobodne energije, što ima za posledicu sporiji rast biomase, procesi su ukupno sporiji i manji su efekti prečišćavanja, ali, krajnji produkti imaju veliki sadržaj energije i kao gasoviti produkti mogu se koristiti kao energenti u vidu biogasa.

Usled razlike u brzini i energiji koja se oslobađa iz ova dva procesa, javlja se i razlika u krajnjim vrednostima koncentracija organskih materija koje zaostaju u otpadnoj vodi, tako da se nakon aerobne obrade, može dobiti znatno bolji kvalitet otpadne vode. Stoga se obično posle anaerobne obrade pribegava i dodatnom aerobnom postupku, radi poliranja kvaliteta efluenta.

U procesima prečišćavanja aerobni procesi su daleko više zastupljeni od anaerobnih i primenjuju se u obradi otpadnih voda sa malom i srednjom koncentracijom organskog zagađenja, tj. u obradi slabo i srednje opterećenih otpadnih voda.

Aerobni procesi prečišćavanja se izvode na dva osnovna načina, kao postupci sa suspendovanom mikroflorom u otpadnoj vodi (proces aktivnog mulja) i procesi sa imobilisanom mikroflorom na pogodnom nosaču, poput biofiltera i biodiskova.

Anaerobno prečišćavanje se češće primenjuje kod otpadnih voda sa velikim koncentracijama organskog zagađenja.

U zavisnosti od kvaliteta sirove otpadne vode, u praksi se kombinuju ova dva postupka, radi postizanja boljeg krajnjeg efekta prečišćavanja.

Načini izvođenja biološkog prečišćavanja i funkcija primenjenog procesa su prikazani u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Definicije i terminologija koja se koristi u oblasti biološkog tretmana otpadnih voda

Termin	Definicija
Supstrat	Termin koji označava organske materije ili hranljive sastojke koji prelaze u drugi oblik tokom biološkog tretmana.
Metabolička funkcija	
Aerobni procesi	Biološki procesi koji se obavljaju u prisustvu kiseonika.
Anaerobni procesi	Biološki procesi koji se obavljaju u odsustvu kiseonika.
Anoksi (anoksi) procesi	Proces kod koga se nitrati biološkim razlaganjem prevode do gasovitog azota, bez prisustva kiseonika. Ovaj proces je poznat i kao <i>denitrifikacija</i> .
Fakultativni procesi	Biološki tretman u kome organizmi mogu funkcionisati i u prisustvu kiseonika i bez prisustva rastvorenog kiseonika u vodi.
Kombinovani aerobni / anoksi / anaerobni procesi	Različite kombinacije aerobnih, anoksi i anaerobnih procesa grupisanih tako da se ostvari specifični cilj tretmana.
Tip procesa tretiranja	
Rast mikroorganizama u suspendovanom stanju	Biološki procesi kod kojih su mikroorganizmi odgovorni za konverziju organskih materija ili drugih sastojaka u otpadnim vodama, održavaju u suspendovanom stanju u tečnosti.
Rast mikroorganizama na inertnim nosačima	Biološki procesi kod kojih su mikroorganizmi odgovorni za konverziju organskih materija ili drugih sastojaka u otpadnim vodama, vezani za neki inertni medijum, kao što je kamenje, šljaka ili specijalno napravljen plastični ili keramički materijal.
Kombinovani procesi	Izraz koji se koristi za opis kombinovanih procesa sastavljenih od niza prethodno dva navedena.
Procesi u lagunama	Opšti termin koji se primenjuje za procese koji se vode u jezercima (ribnjacima) ili lagunama sa različitim odnosima i dubinama.

Funkcije tretmana	
Biološko uklanjanje hranljivih sastojaka, nutrijenata	Biološkim tretmanom vrši se uklanjanje azota i fosfora.
Biološko uklanjanje fosfora	Biološko uklanjanje fosfora vrši se ugradnjom fosfora u ćelije mikroorganizama i njegovom akumulacijom u biomasi.
Uklanjanje ugljeničnog zagađenja, BOD	Biološka konverzija ugljeničnih organskih materija u otpadnim vodama u ćelijsko tkivo i različite krajnje proizvode.
Nitrifikacija	Dvostepeni biološki proces gde amonijak prvo prelazi u nitrite (soli azotaste kis.), a zatim u nitrata (soli azotne kiseline).
Denitrifikacija	Biološki proces kojim se nitrati prevode u gasoviti.
Stabilizacija	Biološki proces kojim se organske materije prisutne u mulju stvorenom u primarnom i sekundarnom taložniku stabilizuju, najčešće do gasovitih produkata i ćelijskog tkiva. U zavisnosti od toga da li se stabilizacija vodi pri aerobnim ili anaerobnim uslovima, proces je poznat kao <i>aerobna</i> ili <i>anaerobna digestija</i> .

Pri biološkom tretmanu otpadnih voda potrebno je ostvariti sledeće ciljeve:

- (1) transformacija (oksidacija) rastvorenih i pojedinih biorazgradivih komponenti u prihvatljiv krajnji proizvod;
- (2) hvatanje i inkorporiranje suspendovanih i neistaloženih koloidnih čvrstih komponenti u biološke flokule ili biofilm;
- (3) transformacija ili uklanjanje nutrijenata (hranljivih sastojaka), kao što su azot i fosfor;
- (4) uklanjanje specifičnih tragova organskih jedinjenja, u pojedinim slučajevima.

Posebno, u slučaju kada se tretiraju industrijske otpadne vode, cilj je uklanjanje ili smanjenje koncentracije organskih i neorganskih jedinjenja koja mogu biti toksična za mikroorganizme, a što bi se nepovoljno odrazilo na rad postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, bilo da se ono

radi u krugu industrijskog pogona ili da se zajedno sa ostalom komunalnom otpadnom vodom, tretira na centralnom gradskom postrojenju. Stoga je svaki industrijski pogon u obavezi da izvrši neophodan predtretman svoje otpadne vode, pre njenog odvođenja na dalji tretman.

4.1. Kinetički parametri i materijalni bilansi bioprocasa

Biološki tretman otpadnih voda je zasnovan na mikrobiološkoj transformaciji organskog zagađenja i njegovog prevođenja u ugljen dioksid, vodu i gradivne materije za novostvorenu biomasu.

Kod mikrobioloških procesa, tokom vremena, dolazi do rasta i povećanja koncentracije mikroorganizama u bioreaktoru, pri čemu se kao izvor gradivnih materija i energije za taj rast troši uneti supstrat, odnosno organsko zagađenje prisutno u otpadnim vodama. Parametri ili faktori životne sredine se odnose na sastav i koncentracije zagađujućih materija u vodi, prisustvo drugih hemijskih komponenti koje pospešuju ili inhibiraju rast, kao i fizičke i fluido-mehaničke parametre sistema, kao što su pH , pritisak, temperatura, način mešanja i aeracije, geometrija reaktora i drugi. Oni direktno utiču na brzinu odvijanja procesa, rast biomase, trošenje prisutnog organskog zagađenja (supstrata), kao i na efikasnost celog procesa. Da bi se taj uticaj matematički opisao, koriste se veličine koje uključuju navedene uticaje i koje se nazivaju kinetički parametri. Vrednosti kinetičkih parametara se ne menjaju sa vremenom u jednom definisanom sistemu. Međutim njihove vrednosti se razlikuju od sistema do sistema, pošto zavise od tipa supstrata, biomase, tipa bioreaktora, od geometrijskih odnosa, fizičkih parametara okoline i fluido-mehaničkih parametara sistema. Ovo znači da se vrednosti kinetičkih parametara ne mogu univerzalno primenjivati na različite sisteme, čak i kada je reč o istoj otpadnoj vodi. Stoga je neophodno pri korišćenju određenih kinetičkih parametara proveriti da li su oni određeni za isti tip sistema u kome se primenjuju ili ne. Ukoliko se ne raspolaze odgovarajućim kinetičkim parametrima, neophodno ih je odrediti eksperimentalno.

Jednačina kojom se opisuje brzinu rasta mikroorganizama je:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad 4.3$$

odakle je:

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu \quad 4.4$$

Veličina μ definiše se kao specifična brzina mikrobnog rasta i u njoj su sadržane sve „specifičnosti“ mikrobiološkog sistema. Ona pokazuje kakav je odnos mikroorganizma prema supstratu, da li su fizički parametri okoline u kome se proces odvija pogodni ili ne za njegov rast, da li postoji uticaj inhibirajućih supstanci ili ne i slično.

Ako se brzina rasta označi sa r_g , tj:

$$\frac{dX}{dt} = r_g \quad 4.5$$

onda je:

$$r_g = \mu \cdot X \quad 4.6$$

$\frac{dX}{dt}$ promena koncentracije mikroorganizama (biomase) po vremenu, $kg/m^3 \cdot h$
 r_g brzina rasta mikroorganizama (biomase), $kg/m^3 \cdot h$
 μ specifična brzina rasta, h^{-1}
 X masena koncentracija ćelija, kg/m^3

Pri analizi bioprocesa, upravo zbog njegove složenosti, u cilju da se matematički opiše, neophodno je uvesti određena uprošćenja, kako bi to uopšte bilo moguće uraditi. U tom cilju, može se poći od pretpostavke da se u ovom slučaju razmatra samo rast mikroorganizama, bez analize drugih parametara. Uvođenjem graničnih uslova da je za $t = 0, X = X_0$, integraljenjem jednačine 4.3, za brzinu rasta mikroorganizama, dobija se izraz:

$$\ln \frac{X}{X_0} = \mu \cdot t \quad 4.7$$

odnosno drugačije napisano:

$$X = X_0 e^{\mu t} \quad 4.8$$

Pošto ova jednačina ima eksponencijalni oblik, kaže se da se rast odvija u eksponencijalnoj fazi. U ovoj fazi specifična brzina mikrobnog rasta ima

maksimalnu vrednost, tj. $\mu = \mu_m$, pa jednačina 4.8 ima oblik:

$$X = X_0 e^{\mu_m t} \quad 4.9$$

Specifična brzina mikrobnog rasta je konstantna vrednost za svaki mikroorganizam u podlozi određenog sastava i pri definisanim parametrima okruženja sistema. *Maksimalna specifična brzina mikrobnog rasta, μ_m* , predstavlja prvi kinetički parametar sistema.

Brojčana vrednost ovog parametra zavisi od naslednih svojstava mikroorganizama, vrste i koncentracije izvora C, N, P, O , faktora rasta i početne koncentracije mikroorganizama u hranljivoj podlozi.

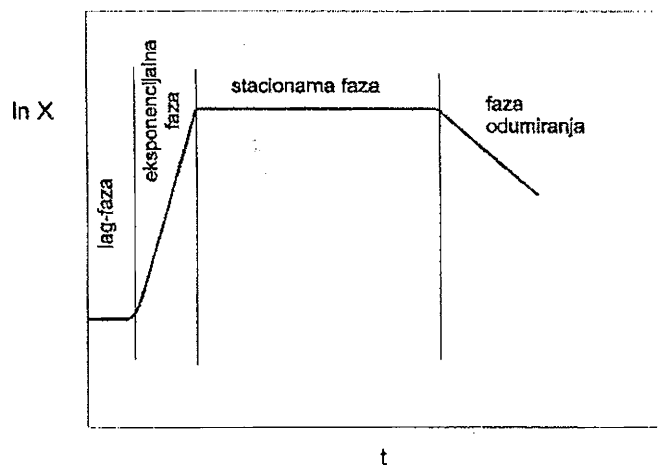
Preuređenjem jednačine 4.7 može se dobiti izraz:

$$\ln X = \mu \cdot t + \ln X_0 \quad 4.10$$

Odnosno, izraz za specifičnu brzinu mikrobnog rasta:

$$\mu = \frac{\ln X - \ln X_0}{t} \quad 4.11$$

Praćenjem promene koncentracije mikroorganizama sa vremenom u diskontinualnom bioreaktoru može se dobiti kriva rasta, slika 4.2.



Slika 4.2. Kriva rasta mikroorganizama

Uočavaju se četiri karakteristične faze:

1. lag faza,
2. eksponencijalna faza,
3. stacionarna faza i
4. faza odumiranja.

Brzina odumiranja mikroorganizama zavisi od vrste mikroorganizama i uslova okoline, a matematička zakonitost je ista kao kod rasta samo što specifična brzina odumiranja k_d ima negativan predznak.

$$\frac{dX}{dt} = -k_d \cdot X \quad 4.12$$

odnosno,

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = -k_d \cdot t \quad 4.13$$

Uključivanjem i rasta i pojave odumiranja mikroorganizama u bioprocesu, rezultujuća promena koncentracija biomase u bioreaktoru je jednaka:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X - k_d \cdot X \quad 4.14$$

ili

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu - k_d \quad 4.15$$

Iz ove jednačine sledi da je stvarna specifična brzina rasta $\frac{1}{X} \frac{dX}{dt}$ zapravo ravnoteža između rasta i odumiranja mikroorganizama.

Specifična brzina odumiranja mikroorganizama, k_d , je drugi kinetički parametar bioprocesa.

Tipična kriva rasta mikroorganizama u diskontinualnim uslovima se dobija kada je brzina razmnožavanja ograničena koncentracijom jednog (limitirajućeg) supstrata u hranljivoj podlozi, u ovom slučaju dominantnog organskog zagađenja u otpadnoj vodi.

Veza između mikrobiološkog rasta i koncentracije limitirajućeg supstrata, uz idealizovan pristup da su svi ostali parametri sistema u optimalnim granicama, data je Monodovim (*Monod*) modelom:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{X \cdot S}{K_s + S} \quad 4.16$$

odnosno, nakon preuređenja:

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad 4.17$$

Konstanta K_s , je mera afiniteta mikroorganizama prema limitirajućem supstratu i ona odgovara onoj koncentraciji supstrata za koji je specifična brzina mikrobog rasta jednaka polovini maksimalne specifične brzine mikrobog rasta, tj. $\mu = \mu_m/2$. Kako ona direktno utiče na brzinu odvijanja procesa, a za određeni proces je konstantna, konstanta K_s predstavlja treći kinetički parametar mikrobiološkog rasta.

Monodov model je razvijen za diskontinualne procese. Međutim, u osnovi on se primenjuje i u kontinualnim sistemima jer razmatra samo odnos biomase prema supstratu, a ne i ostale uslove u kojima se bioproces odvija.

Osnovni materijalni bilans za supstrat u biorektoru se može izraziti kao:

$$\begin{aligned} &-(\text{utrošak supstrata}) \\ &= \text{utrošak za rast} + \text{utrošak za održavanje života} \\ &+ \text{utrošak za sintezu proizvoda metabolizma} \end{aligned}$$

Kod procesa prečišćavanja otpadnih voda praktično dolazi do utroška supstrata samo za rast i održavanje života mikroorganizama, pošto nema stvaranja nekog specifičnog metabolita (oni se primarno javljaju u industrijskim bioprocesima).

Ako se sada utrošak supstrata (zagađujućih materija u otpadnoj vodi) za rast mikroorganizama označi kao Y , onda se može pisati:

$$Y = \frac{\text{masa nastalih ćelija}}{\text{masa utrošenog supstrata}} = \frac{\Delta X}{(-\Delta S)} \quad 4.18$$

U određenom sistemu prinos postaje konstantan, pa se veza brzine rasta i trošenja supstrata, u diferencijalno malim intervalima vremena, može definisati kao:

$$\frac{dX}{dt} = -Y \frac{dS}{dt} \quad 4.19$$

ili

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{dX}{dt} \quad 4.20$$

Prinos biomase po utrošenom supstratu Y je četvrti kinetički parametar.

Da bi se jedan bioproces mogao matematički opisati neophodno je poznavati, prethodno objašnjena, četiri kinetička parametra mikrobnog rasta:

- maksimalna specifična brzina mikrobnog rasta, μ_m
- specifična brzina odumiranja mikroorganizama, k_d ,
- konstanta mere afiniteta mikroorg.prema supstratu, K_s ,
- prinos biomase po utrošenom supstratu, Y ,

Bilo da je reč o diskontinualnim ili kontinualnim procesima, kinetički parametri se moraju poznavati da bi se odredila kinetika bioprocasa. Međutim, u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda, sem retkih izuzetaka, primenjuju se kontinualni procesi, pa će oni i biti posebno analizirani.

Osnovna pretpostavka kod kontinualnog bioreaktora je da se raspodela koncentracije supstrata i prisutne biomase ne menja unutar njegove zapremine i da su koncentracije biomase i supstrata na izlazu iz reaktora konstantne tokom trajanja procesa. Za ovakav reaktor se kaže da radi po principu rada hemostata. Da bi kontinualni proces započeo, neophodno je da se prvo, tokom diskontinualne faze na početku rada, dostignu željene koncentracije na izlazu, kako bi se sa otpočinjanjem kontinualnog procesa, one i održavale na tom nivou.

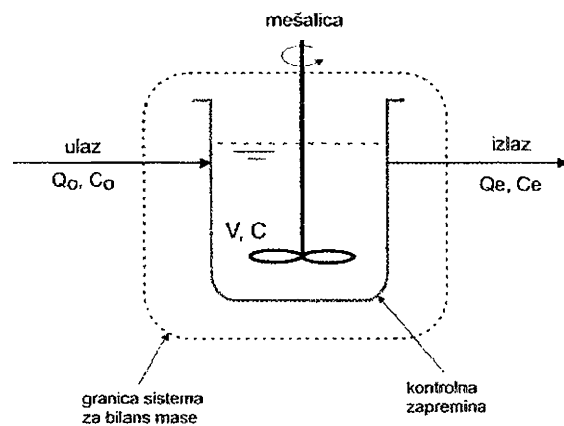
Za opisivanje ponašanja reaktora u nestacionarnom stanju, a koji radi po principu hemostata, koristi se skup diferencijalnih jednačina koje povezuju koncentraciju biomase X i limitirajućeg supstrata S sa nezavisnom promenljivom veličinom protoka sveže hranljive podloge (organskog biorazgradivog zagađenja) Q_0 , odnosno vremenom boravka τ .

ĩ

Ceo proračun bioreaktora se svodi na:

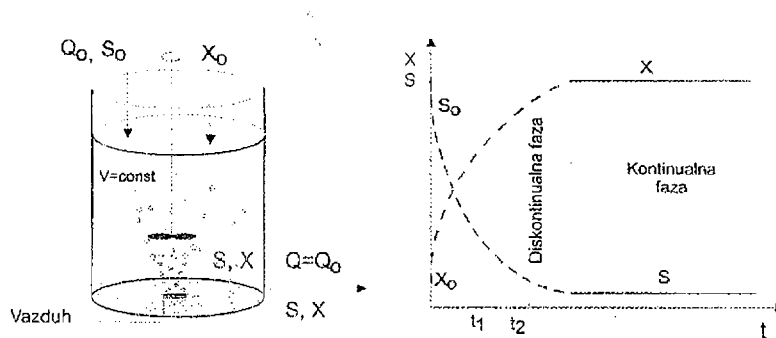
- određivanje potrebne zapremine otpadne vode u reaktoru V za zadanu konverziju supstrata, što predstavlja odnos izlazne prema ulaznoj koncentraciji supstrata, i obrnuto;
- određivanje stepena konverzije supstrata za zadanu zapreminu V .

Granice sistema za koje se određuju bilansi, definisane su na slici 4.3.



Slika 4.3. Granice sistema za kontinualni reaktor sa idealnim mešanjem

Materijalni tokovi i promena koncentracija mikroorganizama, X i supstrata, S , sa vremenom, u kontinualnom bioprocusu, mogu se predstaviti šemom na slici 4.4:



Slika 4.4. Šema materijalnih tokova i koncentracija u kontinualnom bioprocusu

Na osnovu ovako prikazanih tokova, gde su sa indeksom nula označeni ulazni tokovi ili vrednosti na početku procesa, mogu se postaviti materijalni bilansi za biomasu i za supstrat.

Materijalni bilans za biomasu:

Brzina promene koncentracije ćelija
 = ulaz ćelija - izlaz ćelija + prirast ćelija
 - odumiranje ćelija

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X \quad 4.21$$

$Q = Q_0$ zapreminski protok supstrata, m^3/h
 X koncentracija ćelija, kg/m^3
 V zapremina reaktora, m^3
 dX/dt brzina rasta mikroorganizama, $kg/m^3 \cdot h$

Ako se pretpostavi da je $X_0 = 0$ i $k_d = 0$, uz podsećanje da je u stacionarnim uslovima $dX/dt = 0$, onda se jednačina 4.21 svodi na izraz:

$$\frac{Q_0}{V} X = \mu X \quad 4.22$$

odnosno,

$$\frac{Q_0}{V} = \mu \quad 4.23$$

Na ovaj način se pokazuje da je specifična brzina mikrobnog rasta proporcionalna odnosu zapreminskog protoka supstrata na ulazu u reaktor i zapremine supstrata u reaktoru.

Ovaj odnos se naziva i brzina razređenja (razblaženja) i obeležava se sa D :

$$\mu = \frac{Q_0}{V} = D \quad 4.24$$

Osnovni uslov rasta mikroorganizama po principu hemostata podrazumeva da je:

$$D \leq \mu \quad 4.25$$

tj. da je brzina razblaženja manja ili maksimalno jednaka specifičnoj brzini mikrobnog rasta.

Ovaj uslov mora biti zadovoljen da bi se ćelije mikroorganizama razmnožile u količini koja je veća od one koja se izvodi iz bioreaktora, jer u protivnom može doći do ispiranja biomase i prestanka bioprocasa.

Sa druge strane, ako se razmotri količnik zapremine hranljive podloge i zapreminskog protoka dobija se:

$$\frac{V}{Q_0} = \frac{\left[\frac{m^3}{h} \right]}{\left[\frac{m^3}{h} \right]} = [h] = \tau \quad 4.26$$

gde je τ vreme boravka supstrata u bioreaktoru.

Ovo omogućava da se protok supstrata kroz bioreaktor sa mešanjem definiše preko dve veličine:

- vremena boravka, τ i
- brzine razblaženja, D

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \quad D = \frac{Q_0}{V} \quad D = \frac{1}{\tau} \quad 4.27$$

Materijalni bilans za supstrat:

U postavljanju materijalnog bilansa za utrošak supstrata kod sistema za prečišćavanje otpadnih voda zanemaruje se utrošak za nastajanje proizvoda metabolizma ćelija, pošto se usredsređuje pažnja na rast biomase, a ne na stvaranje proizvoda, pa bilans ima oblik:

$$\begin{aligned} & \text{Brzina promene koncentracije supstrata} \\ & = \text{ulaz supstrata} - \text{izlaz supstrata} \\ & \quad - \text{utrošak za rast i održavanje života} \end{aligned}$$

a što se može izraziti jednačinom:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y} \quad 4.28$$

Ako je $-dS/dt = 0$, onda je:

$$\frac{Q_0}{V}(S_0 - S) = \frac{\mu \cdot X}{Y} \quad 4.29$$

pošto je:

$$D = \frac{Q_0}{V} = \mu \quad 4.30$$

onda je:

$$(S_0 - S) = \frac{X}{Y} \quad 4.31$$

tj.

$$X = Y(S_0 - S) \quad 4.32$$

Ovo je odnos koncentracije biomase i koncentracije limitirajućeg supstrata u hemostatu. Izraz pokazuje da je prinos mikrobne biomase nezavistan od brzine rasta ili razređenja, što je samo približno tačno, jer se pretpostavlja da su sem limitirajuće komponente sve ostale u višku i da su fizičko-hemijski parametri konstantni.

Na osnovu definisanih materijalnih bilansa za biomasu i supstrat u kontinualnim procesima i jednačina koje iz njih slede:

$$\frac{Q_0}{V} X = \mu \cdot X - k_d \cdot X \quad 4.33$$

$$\frac{Q_0}{V}(S_0 - S) = \frac{1}{Y} \mu X \quad 4.34$$

Q_0 zapreminski protok supstrata, m^3/h

X koncentracija ćelija, kg/m^3

S_0 ulazna koncentracija supstrata (organskog zagađenja), kg/m^3

S koncentracija supstrata na kraju procesa, kg/m^3

V zapremina reaktora, m^3

uvođenjem zamene:

$$k = \frac{\mu_m}{Y} \quad 4.35$$

mogu biti definisane sve veličine koje nazivamo kinetičkim parametrima:

μ_m maksimalna specifična brzina mikrobnog rasta, h^{-1}

k maksimalana specifična brzina iskorišćenja supstrata,

g supstrata / g biomase $\cdot d$

k_d koeficijent endogenog metabolizma, h^{-1}

K_s konstanta, koncentracija supstrata pri polovini maksimalne specifične brzine rasta, g/m^3

Y prinos biomase po utrošenom supstratu, g biomase / g supstrata

Uvođenjem još jedne zamene $\tau = V/Q$, dobija se izraz:

$$\frac{Q_0}{V}(S_0 - S) = \frac{S_0 - S}{\tau} \quad 4.36$$

Pod pretpostavkom da važi Monodov kinetički model rasta,

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad 4.37$$

zamenom vrednosti za μ i član $\frac{Q_0}{V}(S_0 - S)$ u jednačinu 4.34 dobija se izraz:

$$\frac{S_0 - S}{\tau} = \frac{1}{Y} \mu_m \frac{S}{K_s + S} X \quad 4.38$$

Delenjem jednačine 4.38 sa X , dobija se jednačina:

$$\frac{S_0 - S}{\tau X} = \frac{1}{Y} \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad 4.39$$

koja izražena u recipročnom odnosu ima blik:

$$\frac{\tau X}{S_0 - S} = \frac{Y(K_s + S)}{\mu_m S} \quad 4.40$$

odnosno, razdvajanjem vrednosti u brojiocu desne strane, dobija se oblik, **(A)**:

$$\frac{\tau X}{S_0 - S} = \left(\frac{K_s Y}{\mu_m} \right) \frac{1}{S} + \frac{Y}{\mu_m} \quad 4.41$$

Ukoliko se izvrši zamena:

$$k = \frac{\mu_m}{Y} \quad 4.42$$

onda jednačina A, može biti pisana i u obliku, koji će se označiti sa **(A')**:

$$\frac{\tau X}{S_0 - S} = \left(\frac{K_s}{k} \right) \frac{1}{S} + \frac{1}{k} \quad 4.43$$

Bilo da se koristi oblik 4.41 ili 4.43, ova jednačina je prava linija u koordinatama $\left[\frac{1}{S}; \frac{\tau X}{S_0 - S} \right]$, slika 4.5., pa se može variranjem vremena τ meriti X i S i tako dobiti nekoliko tačaka prave koja je definisana prethodnom jednačinom. Iz nagiba prave i odsečka određuju se dva kinetička parametra rasta.

Polazeći od osnovne jednačine za trošenje supstrata pri kontinualnom rastu,

$$\frac{Q_0}{V} (S_0 - S) = \frac{\mu \cdot X}{Y} \quad 4.44$$

uvođenjem vremena boravka supstrata u hemostatu τ i izražavanjem vrednosti za μ , dobija se:

$$\mu = \frac{1}{\tau X} (S_0 - S) Y \quad 4.45$$

odnosno, uvođenjem recipročne vrednosti, dobija se:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{X \tau}{Y (S_0 - S)} = f(\tau) \quad 4.46$$

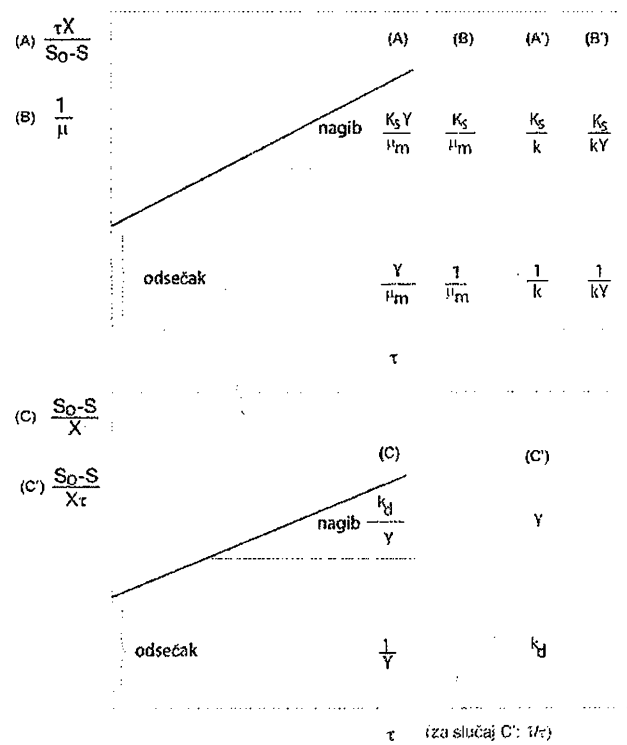
Ako se jednačina 4.43 podeli sa Y , onda je vrednost njene leve strane jednaka $1/\mu$ odnosno dobija se izraz (B):

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_s}{\mu_m} \frac{1}{S} + \frac{1}{\mu_m} \quad 4.47$$

Ili u obliku sa k , izraz (B'):

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_s}{kY} \frac{1}{S} + \frac{1}{kY} \quad 4.48$$

što je, takođe, prava linija u tzv. Lineaver-Barkovim (*Lineveawer-Burk*, (LB)) koordinatama $\left[\frac{1}{S}; \frac{1}{\mu} \right]$, slika 4.5.



Slika 4.5. Određivanje kinetičkih parametara pri kontinualnom rastu mikroorganizama

Kako se k i K_s mogu odrediti iz grafika koji opisuje jednačina A', jednačina 4.43, to se odavde može dobiti vrednost za Y .

Za određivanje preostalog kinetičkog parametra, k_d , potrebno je poći od osnovnog materijalnog bilansa za biomasu:

$$\frac{X}{\tau} = \mu X - k_d X \quad 4.49$$

Polazeći, sa druge strane, od već definisanog bilansa za supstrat:

$$\frac{Q_0}{V} (S_0 - S) = \frac{\mu \cdot X}{Y} \quad 4.50$$

i izražavajući iz njega proizvod μX , dobija se:

$$\mu X = \frac{(S_0 - S)}{\tau} Y \quad 4.51$$

Zamenom u jednačinu 4.49 dobija se:

$$\frac{X}{\tau} = \frac{(S_0 - S)Y}{\tau} - k_d X \quad 4.52$$

Ako se ova jednačina pomnoži sa izrazom τ/YX dobija se:

$$\frac{X}{\tau} \frac{\tau}{XY} = \frac{(S_0 - S)Y}{\tau} \frac{\tau}{XY} - k_d X \frac{\tau}{XY} \quad 4.53$$

odnosno posle skraćivanja, jednačina koja će biti označena sa **(C)**:

$$\frac{(S_0 - S)}{X} = \frac{k_d}{Y} \tau + \frac{1}{Y} \quad 4.54$$

što je prava linija u koordinatama $\left[\tau; \frac{S_0 - S}{X} \right]$ odakle se na osnovu odsečka i nagiba mogu izračunati kinetički parametri k_d i Y , slika 4.5.

Ukoliko se jednačina 4.52 podeli sa X , dobija se oblik **(C')**:

$$\frac{1}{\tau} = Y \left(\frac{S_0 - S}{X\tau} \right) - k_d \quad 4.55$$

Odavde, crtajući dijagram sa koordinatama $\left[\frac{1}{\tau}; \frac{S_0 - S}{X\tau} \right]$, mogu se odrediti kinetički parametri k_d i Y , slika 4.5.

Na ovaj način moguće je definisati kinetičke parametre mikrobiološkog procesa, a koji se, kao konstantne veličine, koriste u bilansima pomoću kojih se mogu odrediti vrednosti koncentracija biomase i supstrata, kao promenljivih veličina, u funkciji vremena. Time je moguće predvideti da li određeni biološki sistem može prečistiti otpadnu vodu od neke početne koncentracije zagađujućih materija, S_0 , do željene izlazne koncentracije S , u toku određenog vremena, a što je i osnovni zadatak u tehnologiji prečišćavanja otpadnih voda.

4.2. Aktivni mulj

Procesi prečišćavanja otpadnih voda sa suspendovanom mikroflorom su, danas, najrasprostranjeniji vid primene aerobnog procesa prečišćavanja, sa primenom posebno pri obradi slabo i srednje opterećenih otpadnih voda, u koje spadaju i komunalne otpadne vode.

Primena ovog vida obrade se sprovodi kroz tri osnovna rešenja:

1. proces sa aktivnim muljem,
2. aerisane lagune i
3. aerobna jezera (plitka jezera sa prenosom kiseonika iz vazduha).

Postupci prečišćavanja otpadnih voda u aerisanim lagunama i aerobnim jezerima se vrše ukoliko su na raspolaganju veliki otvoreni zemljani bazeni (bilo prirodni, nepravilnog oblika ili iskopani, pravougli ili okrugli) koji služe kao biološki reaktori. Osnovni uslov je da te lokacije budu dovoljno udaljene od naselja, kako bi se tolerisao nastanak neprijatnih mirisa tokom procesa.

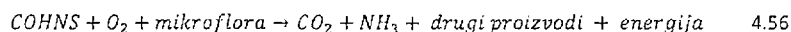
Aerisane lagune su opremljene aeratorima, različitih konstruktivnih rešenja, bilo površinskom aeracijom ili difuzerima. Dubina laguna se kreće od 3 do 4 m, a hidrauličko vreme zadržavanja je od 3 do 30 dana, najčešće 5 do 8 dana. Koncentracija mikroflora u laguni je relativno mala od 100 – 300 mg/L, a uticaj temperature okoline na proces u laguni je veoma izražen. Taloženje mulja se vrši ili na tzv. taložnim poljima, koja se sukcesivno čiste ili u posebno projektovanim sekundarnim taložnicima sa recirkulacijom mulja, radi povećanja efikasnosti procesa.

Kod primene **aerobnih jezera** uslov je da ona budu plitka (od 1 do 1,5 m dubine), a neophodna količina kiseonika za biološku aktivnost se obezbeđuje prenosom mase sa površine vode (preko *ogledala vode*) kao i metabolizmom algi. U isto vreme bakterije koje razgrađuju organske materije, proizvode materije neophodne za rast algi. Vreme zadržavanja otpadne vode u aerobnim jezerima je dugo, obično ne manje od 90 dana, uz veoma malo organsko opterećenje od 0,001 – 0,003 g BOD/m³ · d i limitirano je prenosom mase kiseonika sa površine vode i produkovanog fotosintezom algi.

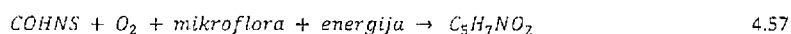
Aktivni mulj je naziv za biološki aktivnu biomasu aerobne mikroflora, suspendovane u otpadnoj vodi u obliku flokula, pri čemu se u flokulama

sem živih, aktivnih, mikroorganizama, nalaze i mrtve ćelije kao i organska (biorazgradiva i bionerazgradiva) i neorganska materija iz otpadne vode koja se prečišćava. U bioreaktoru se aktivni mulj održava u suspenziji a dovodenjem otpadne vode odvijaju se tri paralelna procesa:

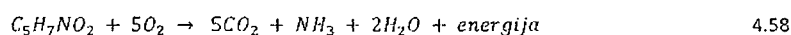
1. Reakcija *disimilacije*, tj. oksidacije organske materije



2. Reakcija *asimilacije*, tj. sinteze novih ćelija mikroflora (sa opštom formulom $C_5H_7NO_2$)



3. Reakcija *autooksidacije*, tj. endogena respiracija ćelija mikroflora



Projektovanje biološkog dela tretmana otpadnih voda u postupku sa aktivnim muljem je kompleksno. Potrebno je odrediti parametre procesa, poput koncentracije aktivne biomase, koncentracije suspendovanih materija, hidrauličko vreme zadržavanja, starost biomase (vreme zadržavanja ćelija), geometriju aeracionog bazena, potrebne količine kiseonika, produkcije biomase, produkcije mulja itd. Ukoliko se vrši recirkulacija biomase u aeracioni bazen iz sekundarnog taložnika, potrebno je izračunati odnos recirkulacionog i ulaznog protoka i koncentracije suspendovanih materija u biorektoru. Izračunate parametre procesa potrebno je uskladiti i optimizovati, da bi se postigao kompaktan i efikasan tretman otpadnih voda.

Postupci prečišćavanja otpadnih voda sa aktivnim muljem mogu se izvoditi kao sistemi bez i sistemi sa recirkulacijom. Nezavisno od toga, sam sistem čine aeracioni bazen i taložnik, kao obavezan segment. Da bi se pravila razlika u odnosu na taloženje u primarnoj obradi, on se naziva sekundarni taložnik. U primarnom taložniku se dominantno izdvaja inertni neorganski deo i manji deo organskog zagađenja, dok se u sekundarnom taložniku iz struje prečišćene otpadne vode izdvaja biomasa, odnosno organska komponenta, sa delom prisutnih inertnih materija koje nije bilo moguće istaložiti u primarnom taložniku. U sekundarnom taložniku se talože i suspendovane čestice koje su nastale u samom procesu sa aktivnim muljem, poput bionerazgradivih ćelijskih delova nastalih endogenom respiracijom.

4.2.1 Suspendovane materije

Proizvedene nove ćelije (biomasa), ćelijski ostaci i prisutne inertne i bionerazgradive čestice u otpadnoj vodi, predstavljaju masu materijala koja se iz bioreaktora mora ukloniti svakoga dana da bi se proces održavao u kontinualnom radu. Od značaja je količina proizvedenih čestica izražena kao TSS , VSS i biomasa. Na slici 4.6. prikazani su odnosi pojedinih konstituenata u aktivnom mulju, gde su sa prefiksima označeni b – biodegradabilni, nb – nebiodegradabilni, a sa i – inertni konstituenti, koji mogu biti isparljive, tj. organske suspendovane materije, VSS ili čvrste pre svega neorganske suspendovane čestice koje su preostale u struji vode nakon primarnog taloženja, TSS . Oznaka $iBSS$ se odnosi na onaj deo ćelija biomase koji je inertan, a koji čini mineralni sastav u ćelijama. Sve čestice koje se nalaze u aeracionom bazenu i organske i biomasa i inertne, čine aktivni mulj i njihova ukupna koncentracija se označava kao $MLSS$. Onaj deo tih čestica koji se odnosi na organski sadržaj označava se sa $MLVSS$. Sve se one mogu staložiti u sekundarnom taložniku, pa je stoga potrebno i znati koja je njihova količina. U aeracionom bazenu se mogu stvarati samo čestice biomase i delovi biomase preostali od endogene respiracije, koje se sabiraju sa nebiodegradabilnim delovima organskih čestica, čime se može dobiti vrednost $P_{X,VSS}$. Njihovim sabiranjem sa inertnim komponentama koje su unete ulaznom strujom ili predstavljaju inertni deo novostvorenih čestica, daje ukupnu produkciju mulja, $P_{X,TSS}$. Podaci o količini nastalog mulja tokom bioprocasa su važni zbog daljeg tretmana i upravljanja sa otpadnim materijalima iz procesa.

Korišćenjem definicije srednjeg vremena zadržavanja ćelija biomase u reaktoru, moguće je izračunati ukupno proizvedeni mulj po danu u sistemu sa aktivnim muljem:

$$P_{X,VSS} = \frac{VX_{MLVSS}}{\theta} \quad 4.59$$

$P_{X,VSS}$ ukupna količina proizvedog organskog dela mulja u toku dana, $gVSS/d$

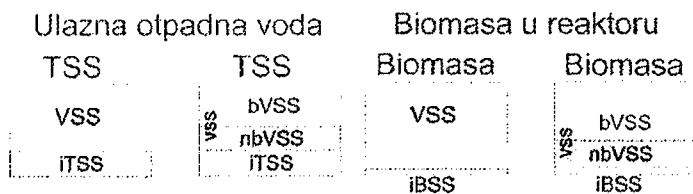
X_{MLVSS} ukupna koncentracija $MLVSS$ u eracionom bazenu, $g VSS/m^3$

V zapremina reaktora, m^3

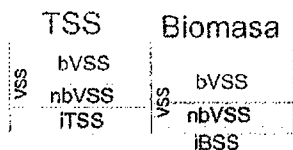
θ vreme zadržavanja čestica, d

Ukupno $MLVSS$ u aeracionom bazenu jednako je zbiru koncentracija biomase, X i koncentracije nebiodegradabilnih volatilnih suspendovanih (partikulativnih) materija $nbVSS$, odnosno vrednost označena kao X_i :

$$X_{MLVSS} = X + X_i \quad 4.60$$

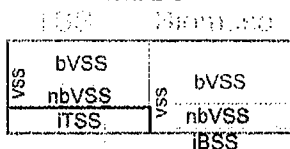


AKTIVNI MULJ



AKTIVNI MULJ

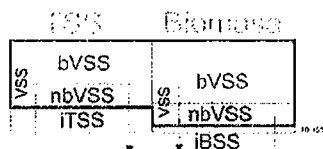
MLSS



$$Q(TSS_0 - FSS_0)$$

AKTIVNI MULJ

MLVSS



$$X_T = X + X_i = \underbrace{\left(\frac{\theta}{\tau}\right) \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta}}_X + \underbrace{f_d(k_d)X\theta + \frac{X_{i0}\theta}{\tau}}_{X_i}$$

$$P_{MLSS} = \frac{A}{0.85} + \frac{B}{0.85} + C + Q(TSS_0 - FSS_0)$$

$$P_{MLVSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d \theta} + f_d(k_d)X\theta + QX_{i0}$$

Slika 4.6. Struktura suspendovanih materija u aeracionom bazenu

Nebiodegradabilne volatilne suspendovane materije, jednim delom, dospevaju u reaktor ulaznom strujom vode. Istovremeno, odumiranjem mikroorganizama u aeracionom bazenu i njihovim endogenim

raspadanjem, preostaje i jedan deo ćelija koji je organskog porekla, ali je bionedegradabilan, tako da se on pridružuje drugim volatilnim suspendovanim česticama u vodi i povećava njihov ukupni sadržaj, koji, zajedno sa ćelijama biomase ulazi u sastav *MLVSS* .

Poštujući ovaj bilans, dobija se vrednost koncentracije suspendovanih volatilnih (organskih) materija u otpadnoj vodi:

$$MLVSS = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau} \quad 4.61$$

MLVSS koncentracija suspendovanih volatilnih (organskih) materija u otpadnoj vodi (*mixed liquor volatile suspended solids*)

f_d frakcija ćelijskih ostataka, *mg/mg*

$X_{o,i}$ koncentracija bionerazgradivih partikulativnih organskih materija koje dolaze sa influentom, *mg/L*

$$\frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} \implies \text{koncentracija mikroorganizama u bioreaktoru}$$

$$(f_d)(k_d)(X)\theta \implies \text{koncentracija ćelijskih ostataka}$$

$$\frac{X_{o,i}\theta}{\tau} \implies \text{koncentracija organskih materija koje dolaze sa influentom}$$

Produkcija biomase u bioreaktoru, se izračunava iz zbira prisutne heterotrofne biomase u reaktoru i količine ćelijskih ostataka:

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \quad 4.62$$

$P_{X,bio}$ produkcija biomase, *kg/d*

Q protok otpadne vode, *m³/d*

$$\frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \implies \text{količina heterotrofne biomase u bioreaktoru}$$

$$\frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \implies \text{količina ćelijskih ostataka u bioreaktoru}$$

Ukupna produkcija volatilnih suspendovanih čestica u bioreaktoru se računa po jednačini:

$$P_{X,VSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + QX_{o,i} \quad 4.63$$

$QX_{o,i}$ \Rightarrow količina bionerazgradivih VSS u influentu

Ukupna produkcija svih suspendovanih čestica u bioreaktoru se računa po jednačini:

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + Q \cdot X_{o,i} + Q \cdot iTSS \quad 4.64$$

$P_{X,TSS}$ produkcija ukupnog mulja u toku dana, kg/d

$iTSS$ koncentracija inertnih materija koje dolaze a influentom,

mg/L

$Q \cdot iTSS$ \Rightarrow količina inertnih TSS u influentu

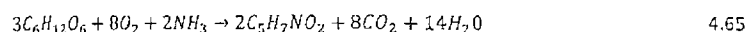
Okvirni kinetički parametri koji se mogu koristiti u prethodnim jednačinama za proračun sistema sa aktivnim muljem dati su u tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Oblast vrednosti karakterističnih koeficijenata procesa aktivnog mulja za sanitarne otpadne vode

Koeficijent	Jedinice	Oblast vrednosti	Tipična vrednost
k	d^{-1}	11 – 20	5
k_d	d^{-1}	0,025 – 0,075	0,06
K_s	$mgBOD/L$	25 – 100	60
	$mgCOD/L$	15 – 70	40
Y	$mg VSS/mg BOD$	0,4 – 0,8	0,6

4.2.2. Količina potrebnog kiseonika za biološko prečišćavanje otpadnih voda

Ako se pođe od osnovne jednačine za biooksidaciju organskih materija pomoću mikroorganizama, postoji određen stehiometrijski odnos između uklonjenog supstrata, vrednosti iskorišćenog kiseonika tokom aerobne heterotrofne biorazgradnje i posmatranog prinosa biomase. Iako se tačna stehiometrija uključena u biološku oksidaciju smeše jedinjenja otpadnih voda nikada ne zna, ipak se u svrhu ilustracije, organske materije mogu predstaviti kao $C_6H_{12}O_6$ (glukoza), a nove ćelije mogu biti pojednostavljeno predstavljene kao $C_5H_7NO_2$. Tako formulisan početni prilaz se može predstaviti jednačinom:



Maseni bilans leve i desne strane koji se odnosi na utrošene komponente i stvorenu masu ćelija glasi:



Prerađeni supstrat (glukoza) se, na osnovu gornje jednačine, delom ugrađuje u nove ćelije biomase, a delom biva oksidovan do CO_2 i H_2O . Prinos biomase po utrošenom supstratu se na osnovu stehiometrije može izraziti kao:

$$Y = \frac{\Delta(C_5H_7NO_2)}{\Delta(C_6H_{12}O_6)} = \frac{2(113)}{3(180)} = 0,42 \frac{g \text{ ćelija}}{g \text{ supstrata}} \quad 4.67$$

U praksi, *COD* i *VSS* se upotrebljavaju za predstavljanje organskih materija i novih ćelija, respektivno. Da bi se izrazio proizvod na osnovu *COD*, mora se odrediti *COD* glukoze. *COD* glukoze se može odrediti pisanjem ravnotežne stehiometrijske reakcije oksidacije glukoze do ugljen dioksida kao što sledi:



odnosno, ponovo kao materijalni bilans:



pa je sada *COD* glukoze:

$$COD = \frac{\Delta(O_2)}{\Delta(C_6H_{12}O_6)} = \frac{6(32)}{(180)} = 1,07 \frac{g O_2}{g \text{ supstrata}} \quad 4.70$$

Teorijski prinos biomase, izražen preko *COD* koji je potrošen za stvaranje biomase (novih ćelija) je:

$$Y = \frac{\Delta(C_5H_7NO_2)}{\Delta(C_6H_{12}O_6 \text{ kao } COD)} = \frac{2(113)}{3(180)(1,07)} = 0,39 \frac{g \text{ ćelija}}{g \text{ COD}} \quad 4.71$$

Treba napomenuti da će vrednost posmatranog prinosa u procesima biološkog tretmana biti manja od date vrednosti, jer će deo supstrata inkorporiranog u ćelijsku masu bakterije oksidirati tokom vremena, kako bi obezbedile energiju za očuvanje ćelija, pa je stvarni prinos uvek manji od teorijskog.

Količina iskorišćenog kiseonika može se izračunati ako se uzme u obzir (1) kiseonik upotrebljen za oksidaciju supstrata do CO_2 i H_2O ; (2) *COD* biomase i (3) *COD* onog supstrata koji nije razgrađen. Ako se za formulu biomase koristi $C_5H_7NO_2$, onda se njena oksidacija može opisati jednačinom:



što daje materijalni bilans odnosa organskog zagađenja i potrebnog kiseonika:

$$(113) \rightarrow 5(32) \quad 4.73$$

Na osnovu ovoga, može se postaviti ekvivalent *COD* za oksidaciju ćelijskog tkiva:

$$COD = \frac{\Delta(O_2)}{\Delta(C_5H_7NO_2)} = \frac{5(32)}{(113)} = 1,42 \frac{g O_2}{g \text{ ćelija}} \quad 4.74$$

Iz jednačine 4.74 se vidi da je ekvivalent potrebnog kiseonika za oksidaciju biomase (izražene kao VSS), potrebno oko 1,42 g *COD*/g biomase VSS.

Na osnovu gornjeg odnosa, potrebni kiseonik koji je upotrebljen po jedinici COD i oksidaciji VSS , može se odrediti iz sledećeg masenog bilansa:

$$COD_{ukupno} = COD_{ćelija} + COD_{oksidovanog\ supstrata} \quad 4.75$$

Vrednost $COD_{oksidovanog\ supstrata}$ je jednaka utrošenom kiseoniku za oksidaciju organskih zagađujućih materija u otpadnoj vodi, pa je:

$$COD_{oksidovanog\ org\ zagađenja} = COD_{ukupno} - COD_{ćelija} \quad 4.76$$

Iz bilansa za oksidaciju glukoze, jednačina 4.72, može se izračunati koliko je ukupno potrebno kiseonika za oksidaciju glukoze:

$$\begin{aligned} COD_{oksidovanog\ org\ zagađenja} &= \\ &= \left(1,07 \frac{g\ O_2}{g\ glukoze} \right) (3 \cdot 180) - \left(1,42 \frac{g\ O_2}{g\ ćelija} \right) (2 \cdot 113) = \\ &= 577,8 - 320,9 = 256,9\ g\ O_2 \end{aligned} \quad 4.77$$

Odavde je utrošeni kiseonik upotrebljen za oksidaciju organskog zagađenja po jedinici COD :

$$\frac{utrošeni\ kiseonik}{glukoza\ kao\ COD} = \frac{256,9}{3(1,07)(180)} = 0,44 \frac{g\ O_2}{g\ COD} \quad 4.78$$

Vrednost potrebnog kiseonika na osnovu COD ravnoteže dat gore je u saglasnosti sa upotrebljenim kiseonikom na osnovu stehiometrije kako je definisano polaznom jednačinom 4.72, u kojoj je 8 *molova* kiseonika potrebno za oksidaciju 3 *mola* glukoze.

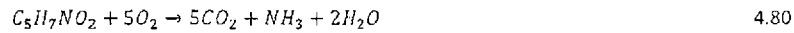
$$\frac{utrošeni\ kiseonik}{glukoza\ kao\ COD} = \frac{8(32)}{3(1,07)(180)} = 0,44 \frac{g\ O_2}{g\ COD} \quad 4.79$$

U prethodnoj analizi definisana je neophodna količina kiseonika potrebna za odvijanje bioprocesa oksidacije zagađujućih organskih materija u otpadnoj vodi, ali je za kinetiku bioloških procesa neophodno poznavati i brzinu trošenja kiseonika u sistemu.

Brzina trošenja kiseonika je određena stehiometrijski uz brzinu oksidacije organskih materija i brzinu rasta.

Tačna stehiometrija uključena u biološku oksidaciju smeše jedinjenja otpadnih voda se nikada ne zna.

Ako se biomasa aproksimativno predstavi formulom $C_5H_7NO_2$, njena oksidacija se može opisati jednačinom:



Iz ove jednačine se dobija da je za 113 g biomase potrebno 160 g kiseonika, pa je time:

$$COD = \frac{\Delta(O_2)}{\Delta(C_5H_7NO_2)} = \frac{5 \cdot 32 \frac{g}{mol}}{113 \frac{g}{mol}} = 1.42 \frac{g O_2}{g biomase} \quad 4.81$$

S' toga se brzina trošenja kiseonika u reaktoru sa aktivnim muljem može odrediti na osnovu bilansa:

$$Upotrebljen\ kiseonik = uklonjen\ bCOD - COD\ otpadnog\ mulja$$

odnosno:

$$R_O = Q(S_0 - S) - 1.42P_{x,bio} \quad 4.82$$

R_O količina potrebnog kiseonika, $kg\ O_2/d$

$P_{x,bio}$ proizvedena biomasa, kg

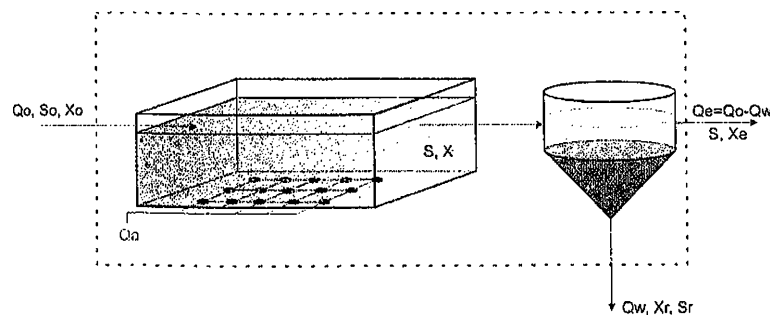
4.2.3. Sistem aktivnog mulja bez recirkulacije

Aktivni mulj čine suspendovani aerobni mikroorganizmi pa je stoga neophodno obezbediti sistem za aeraciju bazena u kome se proces izvodi, odnosno potrebno je dovoditi vazduh (ili čist kiseonik) u bazen određenim protokom Q_a . Napojna struja otpadne vode dolazi sa protokom Q_0 , koncentracijom ulaznog zagađenja S_0 i određenom količinom mikroorganizama X_0 , slika 4.7. Tokom procesa, u bioreaktoru se stvara nova biomasa, koja dostiže koncentraciju X , a koncentracija zagađujućih materija se smanjuje i dostiže vrednost S . Protok otpadne vode kroz aeracioni bazen se ne menja u odnosu na ulazni protok, tako da ista količina vode napušta aeracioni bazen i ulazi u sekundarni taložnik. Čestice aktivnog mulja su neznatno teže od vode i time je omogućeno njihovo taloženje koje se odvija po tzv. taloženju tipa 3, tj. zonalnom taloženju. Ovaj vid taloženja omogućava da čestice mulja „povuku“ ka dnu i druge prisutne čestice, čime se dobija bolji kvalitet

izbistravanja otpadne vode u taložniku. Bistra voda se odvodi preko prelivnika taložnika, a istaloženi mulj se odvodi cevovodom sa dna, protokom Q_w . Protok izbistrene vode, efluenta, jednak je razlici ulaznog protoka, Q_0 i izlaznog protoka mulja, Q_w , tj:

$$Q_e = Q_0 - Q_w \quad 4.83$$

Koncentracija supstrata u efluentu, S_e , koja je jednaka koncentraciji zagađujućih organskih materija koja napušta aeracioni bazen, S , je parametar kojim se definiše ukupna efikasnost sistema za prečišćavanje otpadnih voda. Pored želje da proces radi što efikasnije, obaveza je da se dostigne i kvalitet efluenta koji je propisan pravilnicima, u pogledu maksimalno dozvoljenih koncentracija MDK. U slučaju kada je sekundarni taložnik dobro isprojektovan i radi u okviru definisanih radnih uslova, koncentracija mikroorganizama u izlaznoj struji, X_e , se može zanemariti.



Slika 4.7. Sistem aktivnog mulja bez recirkulacije

U izlaznoj struji mulja, pored protoka, Q_w , posebno je bitna i koncentracija istaložene biomase, X_r , bilo sa aspekta njegovog ugušćavanja, radi dalje manipulacije ili u slučajevima kada se vrši njegova recirkulacija na ulaz aeracionog bazena, da bi se znalo koja količina mulja se vraća u proces. Količina organskog zagađenja koja se u delu vode sa ugušćenim muljem izvodi iz taložnika, S_r , se može zanemariti jer je ona daleko manja od one koncentracije koja je nakon bioprocesa ugrađena u ćelijsku biomasu, a koja se u istoj struji izvodi iz sistema i odvodi na dalji tretman. U slučaju kada se vrši recirkulacija mulja na ulaz u aeracioni bazen, opet je ta količina, znatno manja u odnosu na količinu zagađenja koja dospeva ulaznom strujom, pa se i u tom slučaju može zanemariti i ona nema uticaja na ukupne bilanse u sistemu.

Materijalni bilans za biomasu

Na osnovu već definisanih veličina na ulazu, izlazu i onih koji se mogu stvoriti ili odumreti tokom bioprocesa, slika 4.7., moguće je postaviti sledeći materijalni bilans:

$$\frac{dX}{dt}V = Q_0 X_0 - (Q_0 - Q_w) \cdot X_e - Q_w \cdot X_r + V \mu X - V k_d X \quad 4.84$$

Tokom bioprocesa, u aeracionom bazenu dolazi do rasta i razmnožavanja mikroorganizama, pa koncentracije koje se postižu daleko prevazilaze vrednost koncentracije na ulazu, X_0 . Stoga je opravdano da se u bilansima ulazna koncentracija može zanemariti, tj. da je $X_0 = 0$. U stacionarnom stanju je $dX/dt = 0$, pa je rezultujući bilans:

$$(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r = VX(\mu - k_d) \quad 4.85$$

odnosno:

$$\frac{(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r}{V \cdot X} = \mu - k_d \quad 4.86$$

Izraz na levoj strani jednačine 4.86 označava odnos između količine biomase koja napušta sistem u odnosu na količinu biomase koja se nalazi u bioreaktoru, a izražava se u jedinicama $vreme^{-1}$. Vidi se da ta vrednost odgovara neto rastu biomase tokom bioprocesa, što se postiže kada je vreme zadržavanja biomase u bioreaktoru jednako hidrauličkom vremenu zadržavanja, odnosno:

$$\frac{(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r}{V \cdot X} = \frac{1}{\tau} = \mu - k_d \quad 4.87$$

tj.

$$\frac{1}{\tau} = Y \cdot k \frac{S}{K_S + S} - k_d$$

Rešavanjem ove jednačine po koncentraciji supstrata u bioreaktoru, S , dobija se:

$$S = \frac{K_s (1 + \tau k_d)}{\tau (Yk - k_d) - 1} \quad 4.89$$

Materijalni bilans za supstrat

Na isti način kao i za biomasu, može se postaviti materijalni bilans za supstrat:

$$\frac{dS}{dt} V = Q_0 S_0 - (Q_0 - Q_w) \cdot S - Q_w \cdot S - V \frac{1}{Y} \mu X \quad 4.90$$

Uz zanemarivanje količine supstrata koja se odnosi strujom mulja, tj. da je $Q_w \cdot S = 0$, kao i činjenice da je u stacionarnim uslovima $dS/dt = 0$ dobija se bilans:

$$\frac{Q_0}{V} (S_0 - S) = \frac{1}{Y} \mu X = \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad 4.91$$

odnosno:

$$S_0 - S = \tau \cdot \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad 4.92$$

Ako se iz izraza za bilans biomase izračuna odnos:

$$\frac{S}{K_s + S} = \frac{\frac{1}{\tau} + k_d}{Y \cdot k} \quad 4.93$$

uvrštavanjem u jednačinu 4.92 dobija se:

$$S_0 - S = \tau \cdot k \cdot X \cdot \frac{\frac{1}{\tau} + k_d}{Y \cdot k} \quad 4.94$$

$$Y(S_0 - S) = X \cdot [1 + k_d \cdot \tau] \quad 4.95$$

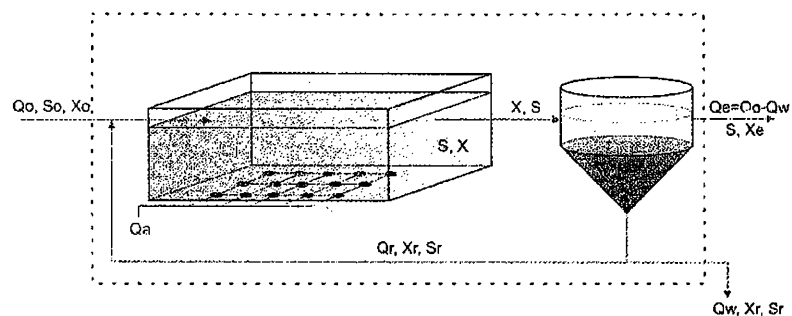
čijim se rešavanjem po vrednosti koncentracije biomase u reaktoru X , dobija:

$$X = \frac{\mu_m (S_0 - S)}{k(1 + k_d \tau)} = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \tau} \quad 4.96$$

- X koncentracija biomase u aeracionom bazenu (bioreaktoru), mg/l .
- S_0 ulazna koncentracija zagađujućih materija, mg/L
- S izlazna koncentracija zagađujućih materija iz bioreaktora, mg/L
- k_d koeficijent endogenog raspadanja, h^{-1}
- τ hidrauličko vreme zadržavanja otpadne vode u bioreaktoru, h

4.2.4. Sistem aktivnog mulja sa recirkulacijom

U sistemima sa recirkulacijom, deo mulja iz izlazne struje se vraća na ulaz aeracionog bazena, meša sa napojnom strujom i tako uvodi u reaktor, slika 4.8. Vrednost protoka koji se recirkuliše, Q_r , može biti promenljiv, a koncentracija biomase u njemu je jednaka koncentraciji biomase u izlaznoj struji iz sekundarnog taložnika X_r . Koncentracija supstrata u recirkulacionoj struji S_r je zanemarljiva u odnosu na ulaznu koncentraciju supstrata, S_0 .



Slika 4.8. Sistem aktivnog mulja sa recirkulacijom

Na taj način ulazni protok vode u aeracioni bazen sa recirkulacijom je jednak:

$$Q = Q_0 + Q_r \quad 4.97$$

Odnos protoka u recirkulacionoj struji, Q_r i ulaznog protoka otpadne vode, Q_0 , naziva se recirkulacioni odnos i definiše kao:

$$R = \frac{Q_r}{Q_0} \quad 4.98$$

Korišćenjem ovog odnosa moguće je definisati i ulazni protok u bioreaktor preko recirkulacionog odnosa, R , kao:

$$Q = Q_0(1 + R) \quad 4.99$$

Kada se posmatraju granice sistema kod bioreaktora sa recirkulacijom biomase, uočava se da su one identične kao i kod sistema bez recirkulacije, pa materijalni bilansi glase:

Materijalni bilans za biomasu

$$\frac{dX}{dt}V = Q_0X_0 - (Q_0 - Q_w) \cdot X_e - Q_w \cdot X_r + V\mu X - Vk_d X \quad 4.100$$

Uz zanemarivanje vrednosti koncentracije biomase u ifluentu, X_0 , i usvajanja da je u stacionarnom stanju $dX/dt = 0$, dobija se bilans:

$$(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r = VX(\mu - k_d) \quad 4.101$$

odnosno:

$$\frac{(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r}{V \cdot X} = \mu - k_d \quad 4.102$$

Izraz na levoj strani jednačine 4.102 označava odnos između količine biomase koja napušta sistem u odnosu na količinu biomase koja se nalazi u bioreaktoru, a izražava se kao $vreme^{-1}$. Kod sistema sa recirkulacijom, deo biomase koja se, u ovom slučaju, izvodi iz taložnika se vraća u bioreaktor, pa je ukupna količina biomase u bioreaktoru jednaka zbiru biomase nastale rastom i dela biomase koji je recirkulisan. Na taj način, ako se uzme recipročna vrednost odnosa na levoj strani jednačine 4.102, dobija se veličina koja se naziva *srednje vreme zadržavanja mulja* u biorektoru ili *starost biomase*, θ :

$$\theta = \frac{V \cdot X}{(Q_0 - Q_w) \cdot X_e + Q_w \cdot X_r} \quad 4.103$$

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r + Q_e X_e} \quad 4.104$$

Q_e protok efluenta, m^3/d

tj. uvrštavanjem u prethodnu jednačinu dobija se:

$$\frac{1}{\theta} = Y \cdot k \frac{S}{K_S + S} - k_d \quad 4.105$$

odakle se može dobiti vrednost za koncentraciju supstrata u reaktoru:

$$S = \frac{K_S (1 + \theta k_d)}{\theta (Yk - k_d) - 1} \quad 4.106$$

Pošto je srednje vreme zadržavanja definisano kao odnos prisutne biomase u reaktoru prema onoj koja se iz sistema odvodi, a odvodi se samo ona količina koja nastaje rastom biomase u reaktoru, može se koristiti i izraz:

$$\theta = \frac{VX}{\frac{\mu_m SXV}{K_S + S} - k_d XV} = \frac{K_S + S}{\mu_m S - k_d (K_S + S)} \quad 4.107$$

Materijalni bilansi za supstrat

Postavljanjem bilansa za supstrat u bioreaktoru sa recirkulacijom, vidi se da je on jednak bilansu bioreaktora bez recirkulacije, što je i logično, pošto supstrat prolazi kroz bioreaktor na isti način i nema njegove recirkulacije:

$$\frac{dS}{dt} V = Q_0 S_0 - (Q_0 - Q_w) \cdot S - Q_w \cdot S - V \frac{1}{Y} \mu X \quad 4.108$$

Uz zanemarivanje količine supstrata koja se odnosi strujom mulja, $Q_w \cdot S$, kao i činjenice da je u stacionarnim uslovima $dS/dt = 0$ dobija se bilans:

$$\frac{Q_0}{V}(S_0 - S) = \frac{1}{Y}\mu X = \frac{k \cdot X \cdot S}{K_S + S} \quad 4.109$$

odnosno:

$$S_0 - S = \tau \cdot \frac{k \cdot X \cdot S}{K_S + S} \quad 4.110$$

Ako se iz izraza za bilans biomase:

$$\frac{1}{\theta} = Y \cdot k \frac{S}{K_S + S} - k_d \quad 4.111$$

izračuna odnos:

$$\frac{S}{K_S + S} = \frac{\frac{1}{\theta} + k_d}{Y \cdot k} \quad 4.112$$

i zameni u prethodnu jednačinu, dobija se:

$$S_0 - S = \tau \cdot k \cdot X \frac{\frac{1}{\theta} + k_d}{Y \cdot k} \quad 4.113$$

odakle se lako izračunava vrednost koncentracije biomase u reaktoru:

$$X = \frac{\theta Y (S_0 - S)}{\tau (1 + k_d \theta)} \quad 4.114$$

Odnos količina zagađenja i prisutne biomase u bioreaktoru, F/M

Važan parametar u projektovanju procesa sa aktivnim muljem je odnos zagađujućih biorazgradivih materija prema masi prisutnih mikroorganizama u reaktoru, a definiše se na sledeći način:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\tau X} \quad 4.115$$

F/M količina zagađenja i prisutne biomase u bioreaktoru, kg/kg

4.2.5. Sistem aktivnog mulja sa idealnim proticanjem

Sistem sa idealnim proticanjem i recirkulacijom ćelija može biti upotrebljen za modelovanje efikasnih procesa sa aktivnim muljem. Karakteristična razlika ovog sistema, u odnosu na bioreaktor sa idealnim mešanjem, je da je hidraulički režim reaktora u funkciji prirode ulaznog toka. U modelu sa idealnim proticanjem, sve čestice koje uđu u bioreaktor u njemu ostaju isto vreme. Neke čestice mogu napraviti više prolaza kroz bioreaktor zbog recirkulacije, ali kada su u aeracionom bazenu, kroz njega sve prolaze za isto vreme.

Kinetički model sistema sa idealnim proticanjem je matematički komplikovan, ali je moguće uvesti dve olakšavajuće pretpostavke koje vode primeni samog kinetičkog modela u praktične svrhe:

1. Koncentracija mikroorganizama u ulaznom toku u reaktor je aproksimativno ista kao i u izlaznom toku iz reaktora. Ova pretpostavka se primenjuje samo ako je $\theta/\tau > 5$. Krajnja srednja koncentracija mikroorganizama u reaktoru se obeležava simbolom \bar{X} .
2. Brzina iskorišćenja supstrata kada zagađenje prođe kroz reaktor je data sledećim izrazom:

$$r_{su} = -\frac{kS\bar{X}}{K_s + S} \quad 4.116$$

Integracijom jednačine 4.116 po vremenu zadržavanja otpadne vode u aeracionom bazenu, zamenom vrednosti za \bar{X} i uprošćavanjem, dobija se sledeći izraz:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{Yk(S_0 - S)}{(S_0 - S) + (1 + R)K_s \ln\left(\frac{S_{in}}{S}\right)} - k_d \quad 4.117$$

S_0 koncentracija u ulaznom toku

S koncentracija u izlaznom toku

S_{in} koncentracija u ulaznom toku u reaktor posle razblaživanja sa povratnim tokom

R recirkulacioni odnos.

Ostale veličine su definisane ranije.

Ova jednačina je slična jednačini koja se primenjuje za sisteme sa idealnim mešanjem, sa ili bez recirkulacije. Glavna razlika u ovim jednačinama je da je kod sistema sa idealnim proticanjem, srednje vreme zadržavanja čelija, θ , u funkciji od koncentracije S_0 u otpadnoj vodi koja ulazi u sistem. Ovaj oblik jednačine se inače koristi i kod sistema reaktora sa idealnim mešanjem, povezanih u seriji, samo se umesto vrednosti \bar{X} koriste vrednosti za koncentraciju biomase u svakom pojedinačnom reaktoru X .

Pri proračunu sistema sa aktivnim muljem koriste se relevantni kinetički parametri, a uobičajene vrednosti za komunalnu otpadnu vodu su date u tabeli 4.3.:

Tabela 4.3. Vrednosti kinetičkih koeficijenata za proces aktivnog mulja pri tretmanu komunalne otpadne vode u reaktoru sa idealnim proticanjem.

Koeficijent	Jedinice	Vrednost	
		Opseg	Uobičajena
k	$1/d$	2 – 10	4
K_s	$mg\ COD/L$	15 – 70	40
	$mgBOD/L$	25 – 100	60
Y	$mgVSS/mgCOD$	0,3 – 0,6	0,4
	$mgVSS/mgBOD$	0,4 – 0,8	0,6
k_d	$1/d$	0,02 – 0,1	0,055

4.2.6. Sistem sa sukcesivnom oksidacijom ugljenika i azota (nitrifikacija)

Nitrifikacija je termin koji se koristi za opisivanje dvostepenog biološkog procesa u kome se amonijak, rastvoren u obliku amonijum jona, NH_4^+ oksidiše do nitrita NO_2^- , a potom se nitrit oksidiše do nitrata NO_3^- . Oksidacija azota u postupku prečišćavanja otpadnih voda nastaje zbog negativnih efekata koji on u vodi izaziva, a što se ogleda u njegovoj toksičnosti po živi svet, kada je prisutan u obliku amonijaka, povećanoj eutrofikaciji prirodnih recipijenata, kao i u slučaju da se prečišćena voda ponovo koristi, na primer, za navodnjavanje. U postrojenjima za preradu vode amonijak, takođe, reaguje sa hlorom smanjujući time efikasnost procesa dezinfekcije, pa je zbog toga kontrola koncentracije azota u otpadnim vodama neophodna.

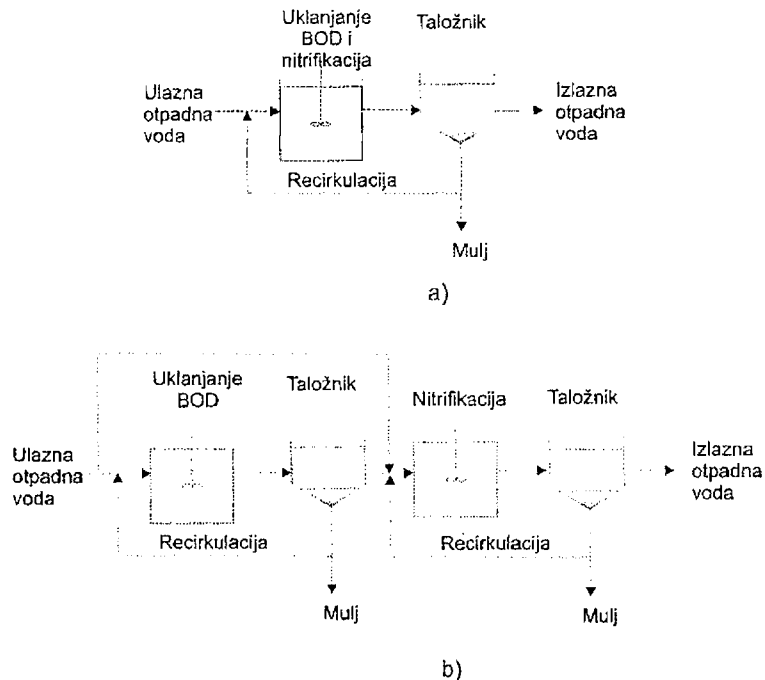
Oksidacijom amonijum jona do nitrata, azot se prevodi u manje štetan oblik, ali u konačnom tretmanu, azot se mora ukloniti iz vode do nivoa prihvatljivih i pravilnicima o kvalitetu vode propisanih koncentracija. Postupak redukcije azota iz nitratnog oblika do gasovitog azota se naziva denitrifikacija.

Azot se u otpadnim vodama nalazi u formi organskog, amonijačnog, nitritnog i gasovitog azota. Organski azot može egzistirati u rastvornom i nerastvornom obliku. Rastvorni organski azot je uglavnom u obliku uree i aminokiselina.

Ukupna koncentracija organskog i koncentracija amonijačnog azota u gradskim otpadnim vodama je obično u intervalu od 25 do 45 mg/L, međutim, u uslovima gde je potrošnja vode po stanovniku manja, ta se koncentracija može i značajno povećati, posebno u seoskim domaćinstvima koja se bave uzgojem domaćih životinja.

Kao što je poznato, prilikom eksperimentalnog određivanja vrednosti *BOD*, prvo se vrši oksidacija ugljeničnog organskog zagađenja od strane heterotrofnih bakterija, da bi po njegovom iscrpljivanju, autotrofne bakterije oksidovale organsko zagađenje koje u sebi sadrži azot. Na taj način u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda, prvo je potrebno ukloniti ugljenično zagađenje, pa tek nakon toga azotno. To se može obaviti tako što se vreme trajanja procesa produžava ili se u samoj konstrukciji bioreaktora obezbedi zona u kojoj je moguće obavljati sukcesivno ova dva procesa. Autotrofne bakterije su daleko osetljivije na prisustvo određenih inhibitornih ili toksičnih supstanci u vodi, pa je u

nekim slučajevima potrebno i potpuno odvojiti proces uklanjanja *BOD* od procesa nitrifikacije, a što je pokazano na slici 4.9., pod *a* i *b*, respektivno.



Slika 4.9. Obavljanje procesa nitrifikacije a) u zajedničkom i b) u odvojenim reaktorima

U oba slučaja se iza aeracionog bazena ugrađuje taložnik sa recirkulacijom, kako bi se obezbedilo dovoljno vreme zadržavanja za obavljanje biološkog procesa.

Proizvodnja čestica mulja tokom procesa nitrifikacije je manja od proizvodnje prilikom uklanjanja *BOD* zagađenja, pa se često deo ulazne otpadne vode, koja sadrži određenu količinu suspendovanih materija premesti do bioreaktora za nitrifikaciju, kako bi se poboljšale taložne karakteristike čestica i obezbedili uslovi za kvalitetnije izbistravanje vode u taložniku nakon nitrifikacije. Bakterije odgovorne za nitrifikaciju, mnogo sporije rastu nego heterotrofne bakterije, pa je neophodno projektovati sistem sa mnogo dužim hidrauličkim vremenom zadržavanja čestica u odnosu na proces za uklanjanje *BOD*. Ove

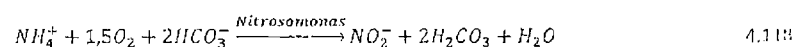
bakterije, za razliku od heterotrofnih, koriste ugljen-dioksid umesto organskog ugljenika za svoj rast i reprodukciju, pa je zbog toga njihov prinos i manji u odnosu na prinos heterotrofa.

Nitrifikacija je dvostepeni proces koji se obavlja pomoću dve grupe bakterija. U prvom koraku, amonijak se oksiduje do nitrita jednom grupom autotrofnih bakterija, a u drugom, nitriti se oksidišu do nitrata uz pomoć druge grupe autotrofnih bakterija. Ove dve grupe autotrofnih bakterija se jasno razlikuju. U procesu nitrifikacije učestvuju autotrofne bakterije *Nitrosomonas* i *Nitrobacter*, koje oksiduju amonijak do nitrita i onda do nitrata, respektivno. Drugi rod autotrofnih bakterija koji omogućava dobijanje energije putem oksidacije amonijaka do nitrita (prefiks *Nitroso-*) su *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* i *Nitrosorobrio*. Najnovija istraživanja su pokazala da postoji i veći broj autotrofnih bakterija koje su sposobne da oksidišu amonijak.

Pored mikroorganizama *Nitrobacter*, nitriti mogu, takođe, biti oksidisani i drugim autotrofnim bakterijama roda *Nitrococcus*, *Nitrospira*, *Nitrospina* i *Nitroaestis*. Eksperimentalna istraživanja su, takođe, pokazala da je u sistemu sa aktivnim muljem, pri oksidaciji amonijaka, dominantno bila prisutna bakterija *Nitrosomonas*, dok je za oksidaciju nitrita u aktivnom mulju *Nitrococcus* preovladavao, druge prisutne bakterije. Trenutno nije poznato da li različiti uslovi rasta mogu odabrati različite rodove nitrifikacionih bakterija ili da li je njihova kinetika nitrifikacije značajno različita.

Jednačine, koje opisuju biohemijske procese nitrifikacije su sledeće:

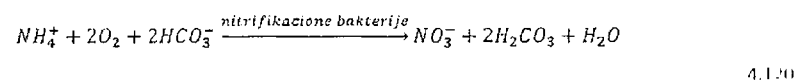
Oksidacija amonijaka:



Oksidacija nitrita:



a ukupna reakcija:



Da bi se oksidisao 1 mg/L amonijačnog azota, teorijski je potrebno 4,56 mg/L kiseonika, pod pretpostavkom da se zanemari sinteza nitrifikacionih bakterija. Stvorena ugljenična kiselina u reakciji snižava pH vrednost otpadne vode. Teorijski, po jednom mg/L oksidisanog

amonijačnog azota utroši se $7,14 \text{ mg/L CaCO}_3$ za neutralizaciju proizvedene kiseline.

Sekundarni efluent koji sadrži visok sadržaj amonijaka i nisko BOD zagađenje je podloga u kojoj nitrifikacione bakterije bolje rastu nego heterotrofne bakterije.

Kod uklanjanja azota, kao i kod uklanjanja organskog ugljenika izračunavaju se isti parametri procesa koji u sebi sadrže i uticaj nitrifikacionog procesa na sistem sa aktivnim muljem.

Po istom principu u sistemima sa sukcesivnom nitrifikacijom, komplementarne jednačine su:

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})\theta} \quad 4.121$$

Y_n prinos nitrifikacionih bakterija po utošenom supstratu (azotu), mg/mg

NO_x koncentracija azotnih oksida, mg/L

k_{dn} koeficijent endogenog raspadanja nitrifikacionih bakterija, h^{-1}

$$\frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})\theta} \rightarrow \text{količina nitrifikacionih mikroorganizama u bioreaktoru}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{X,bio} + 4,33Q(NO_x) \quad 4.122$$

$$P_{X,VSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})\theta} + QX_{o,i} \quad 4.123$$

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + QX_{o,i} + QiTSS \quad 4.124$$

Bilans azota:

$$NO_x = TKN - N_e - 0,12 \frac{P_{X,bio}}{Q} \quad 4.125$$

TKN ukupni Kjeldalov azot, mg/L
 N_e koncentracija azota u efluentu, mg/L

$0,12 \frac{P_{x,bio}}{Q}$ količina azota utrošena na rast i razvoj bakterija, mg/L

Specifična brzina rasta nitrifikacionih bakterija računa se po jednačini:

$$\mu_n = \left(\frac{\mu_{mn} N}{K_n + N} \right) \cdot \left(\frac{DO}{K_0 + DO} \right) - k_{dn} \quad 4.126$$

μ_n specifična brzina rasta nitrifikacionih bakterija, h^{-1}
 μ_{mn} maksimalna specifična brzina rasta nitrifikacionih bakterija, h^{-1}
 K_n konstanta zasićenja supstratom, mg/L
 N koncentracija azota, mg/L
 K_0 konstanta zasićenja kiseonikom, mg/L

Vrednosti kinetičkih parametara nitrifikacionih bakterija su dati u tabeli 4.4.:

Tabela 4.4. Vrednosti kinetičkih parametara za rast nitrifikacionih bakterija (vrednosti se odnose na čiste kulture, i za temperaturu od 20 °C) za sistem sa aktivnim muljem

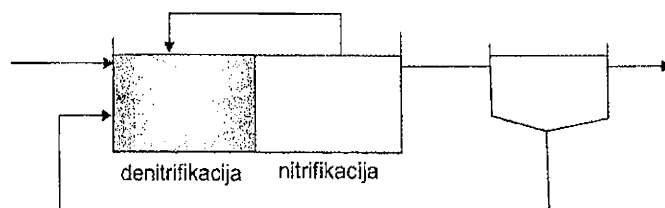
Kinetički koeficijent		Jedinica	Oblast vrednosti	Tipična vrednost
<i>Nitrosomonas</i>	μ_m	d^{-1}	0,3 – 2,0	0,7
	K_s	$NH_4^+ mg/L$	0,2 – 2,0	0,6
<i>Nitrobacter</i>	μ_m	d^{-1}	0,4 – 3,0	1,0
	K_s	$NO_2^- mg/L$	0,2 – 5,0	1,4
Ukupni	μ_m	d^{-1}	0,3 – 3,0	1,0
	K_s	$NH_4^+ mg/L$	0,2 – 5,0	1,4
	Y	$mg VSS / mg NH_4^+$	0,1 – 0,3	0,2
	k_d	d^{-1}	0,03 – 0,06	0,05

4.2.7. Biološka denitrifikacija

Nitrati koji nastaju u procesu nitrifikacije otpadnih voda, se moraju, takođe, ukloniti iz vode, ukoliko njihova koncentracija premaši maksimalno dozvoljene koncentracije, za odgovarajući prirodni recipijent.

Kod bioloških procesa, mogu se obaviti dva načina uklanjanja nitrata iz otpadne vode, i to postupkom asimilacije i disimilacije. Kod procesa asimilacije, redukcija nitrata se vrši do amonijaka koji potom služi u ćelijskim sintezama.

Disimilativna redukcija nitrata, koja predstavlja osnov biološke denitrifikacije, vezana je za respiratorni lanac u sistemu i transport elektrona, pošto se i nitrat i nitrit koriste kao akceptori elektrona za oksidaciju različitih organskih ili neorganskih donora elektrona. Na taj način, da bi do denitrifikacije došlo, neophodno je prisustvo nekog izvora ugljeničnog organskog zagađenja. To omogućava da se otpadna voda u kojoj je prethodno obavljen proces nitrifikacije, dovede u kontakt sa napojnom otpadnom vodom, u zoni bez aeracije, gde će doći do oksidacije organskog ugljeničnog zagađenja i istovremene redukcije nitrata i nitrita, do gasovitog azota, slika 4.10. Na taj način se postiže dvojak efekat: donekle se umanjuje ugljenično zagađenje, a istovremeno oslobađa od azotnog zagađenja.



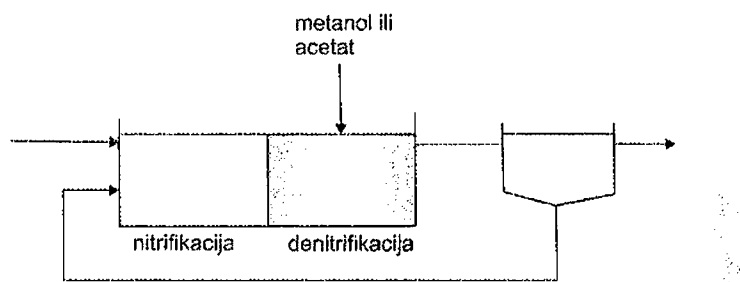
Slika 4.10. Preanoksi denitrifikacija

U zoni denitrifikacije se vrši oksidacija bez prisustva kiseonika i ti uslovi se nazivaju *anoksi uslovi*. Ovako opisan proces se najčešće koristi u biološkom uklanjanju azota iz komunalne otpadne vode, a poznat je kao modifikovan Ludžak-Etingerov (*Ludzak – Etinger*) proces. Anoksi zona se u reaktoru nalazi pre aerobne zone, pa se stoga koristi i naziv *preanoksična denitrifikacija*. Količina amonijum jona koja je ušla u napojnu struju, prolazi anoksi zonu, dospeva u zonu nitrifikacije, gde se, nakon iscrpljivanja ugljeničnog zagađenja, oksidiše do nitrata, koji se

potom vraćaju u anoksi zonu, gde se izdvaja gasoviti azot i time se napojna otpadna voda prečišćava od azotnih jedinjenja.

U drugom procesu, denitrifikacija se obavlja posle nitrifikacije i izvor donora elektrona je organsko zagađenje koje je nastalo endogenim raspadanjem ćelija biomase, slika 4.11. Anoksi zona u ovom slučaju je iza aeracione zone, pa se ovaj vid uklanjanja naziva *postanoksična denitrifikacija*.

U njemu se prvo uklanja *BOD* i on kasnije ne može biti dostupan pri obavljanju reakcije redukcije nitrata, već jedino ćelijski ostaci, čija koncentracija zavisi direktno od brzine endogene respiracije. Ovaj proces je sporiji u odnosu na proces u preanoksičnoj zoni, u kome se koristi *BOD* otpadnih voda. Da bi se povećala brzina denitrifikacije, u ovom procesu se koriste dodatni izvor ugljenika, najčešće u obliku jeftinih metanola ili acetata, čime se obezbeđuje dodatna količina *BOD* za redukciju nitrata.



Slika 4.11. Postanoksi denitrifikacija

Pored ova dva najčešće korišćena procesa postoje i mnoge druge modifikacije koje se sa manje ili više uspeha primenjuju u praksi, a jedan od njih je i tzv. *anamoks (anammox) proces* koji se zasniva na oksidaciji amonijum jona pomoću nitrita pri anaerobnim uslovima, pri čemu se proizvodi gas azota i mala količinu nitrata. Za uklanjanje azota u ovom procesu nije potrebno postojanje izvora ugljenika.

Biološka denitrifikacija uključuje biološku oksidaciju mnogih organskih supstrata u prečišćavanju otpadnih voda upotrebom nitrata ili nitrita kao akceptora elektrona umesto kiseonika. U odsustvu rastvorenog kiseonika ili pri njegovim ograničenim koncentracijama, enzim nitratna reduktaza podstiče transport elektrona u respiratornom lancu i pomaže prenos vodonika i elektrona do nitrata, kao krajnjeg akceptora

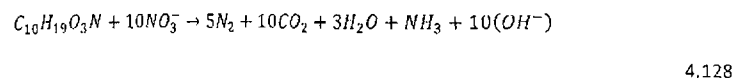
elektrona. Redukcione reakcije nitrata uključuju sledeće redukzione nivoe od nitrata do nitrita, azotni oksid, do azotastog oksida i do gasovitog azota:



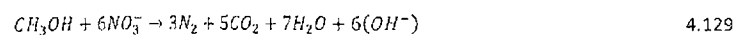
U biološkom procesu uklanjanja azota, donor elektrona je obično jedan od tri izvora: (1) *bsCOD* u ulaznoj struji otpadne vode, (2) *bsCOD* proizvedeno tokom endogenog raspadanja, (3) egzogeni izvor kao što je metanol ili acetat.

Poslednji se dodaje u posebnoj jedinici, kao što su „polirajući“ filtri, posle nitrifikacije, gde ne ostaje gotovo nikakva količina *bsCOD*. Stehiometrija jednačine za različite donore elektrona je prikazana jednačinom 4.128, pri čemu se kao izraz za biorazgradive organske materije u otpadnim vodama, koristi $C_{10}H_{19}O_3N$.

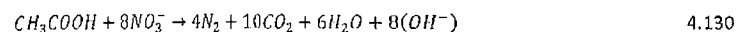
U slučaju kada je organsko zagađenje u otpadnoj vodi donor elektrona:



Kada je metanol donor elektrona:



Kada je acetat donor elektrona:



U svim prethodnim heterotrofnim reakcijama denitrifikacije, jedan ekvivalent baze se proizvodi po ekvivalentu redukovano NO_3^- , što je jednako 3,57 g proizvedene baze (kao $CaCO_3$) po g redukovano nitrata do azota. Za proces nitrifikacije se troši 7,14 g baze (kao $CaCO_3$) po g oksidovanog amonijum jona, što znači da se u ukupnom procesu oko jedne polovine upotrebljene baze pri nitrifikaciji stvori ponovo u procesu denitrifikacije.

U biološkoj denitrifikaciji, važan parametar pri projektovanju je vrednost potrebnog *bsCOD* ili *BOD* da obezbede dovoljnu količinu donora elektrona za uklanjanje nitrata. Najčešća procena je da je potrebno oko 4 g *BOD* po g redukovano NO_3^- . Prava vrednost će zavisiti od operativnih uslova sistema i od tipa donora elektrona koji se koristi za denitrifikaciju.

4.2.8. Biološko uklanjanje fosfora

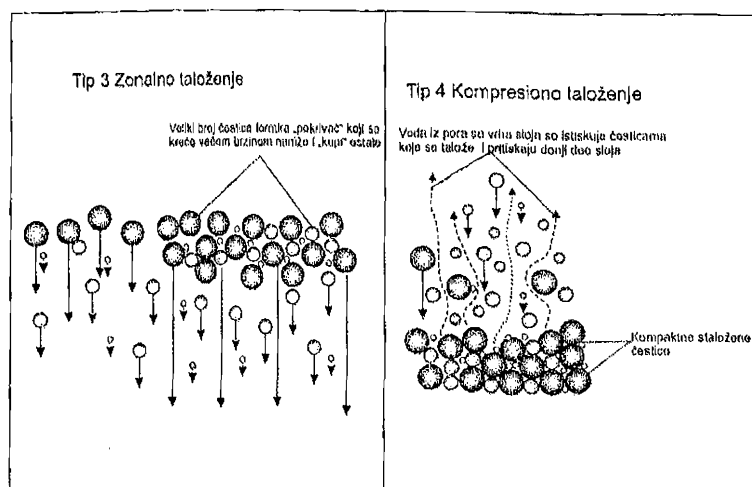
Fosfor, zajedno sa azotom, prisutan u višku izaziva eutrofikaciju vodotoka i mora se ukloniti. Najčešće uklanjanje fosfora predstavlja predmet tercijerne obrade otpadnih voda, ali je moguće u samoj biološkoj obradi koja u osnovi čini sekundarnu obradu, ugraditi pojedine segmente u procesu koje će podstaći razvoj tzv. fosfat akumulirajućih mikroorganizama. Oni imaju sposobnost vezivanja fosfata u svoju ćelijsku masu, pa se njihovim podsticanjem na rast i korišćenje fosfora uklanja fosfor iz vode. Takva biomasa se zajedno sa ostalim delom proizvedenog mulja, uklanja iz otpadne vode taloženjem.

Uprošćena verzija procesa se obavlja u anaerobnim i aerobnim/anoksi reaktorima ili pojedinim delovima reaktora za biološku obradu otpadnih voda. U mnogim primerima, formira se niz anaerobni, anoksi, aerobni bioreaktor pošto većina fosfat akumulirajućih mikroorganizama može koristiti nitrat umesto kiseonika da oksiduje svoj uskladišteni izvor ugljenika i time obezbedi energiju za svoj život i rast.

4.3. Sekundarno taloženje

Suspenzija vode i aktivnog mulja, na izlazu iz aeracionog bazena, uvodi se u taložnik, kako bi se izvršilo bistrenje otpadne vode, pre odvođenja na dalji tretman. Ovim postupkom se završava faza sekundarne obrade otpadnih voda, pa je stoga i usvojen termin sekundarni taložnik, a proces taloženja u njemu se naziva *sekundarno taloženje*.

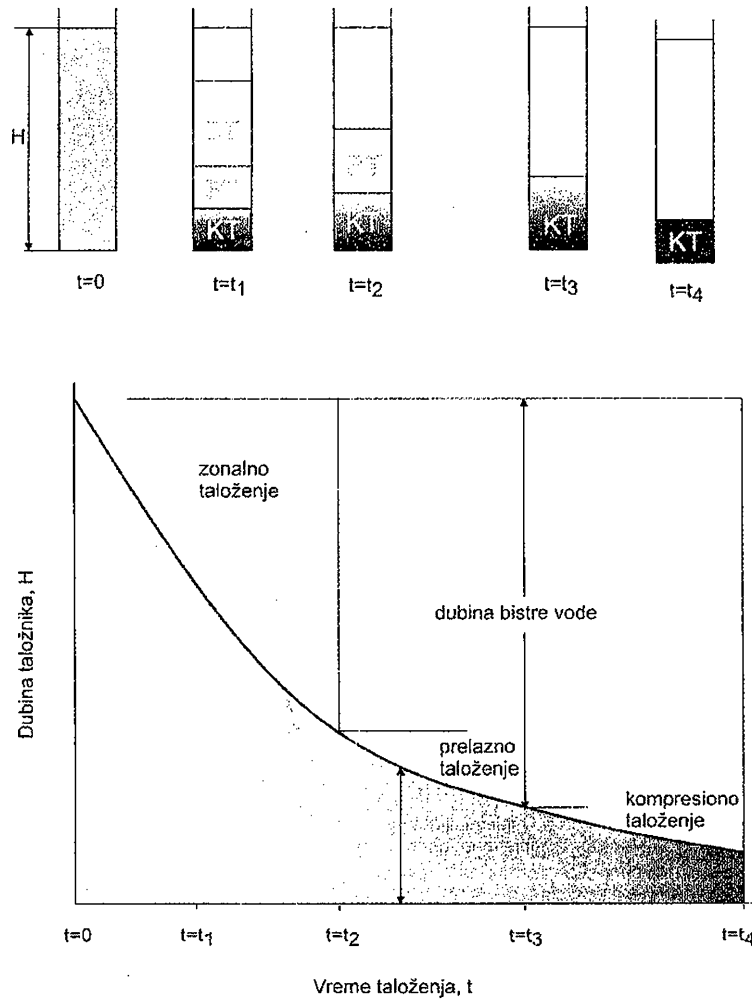
Za razliku od čestica u primarnom taložniku koje se talože kao diskretne ili čestice skupljene u agregatima, tzv. taloženje po tipu 1 i tipu 2, u sekundarnom taložniku čestice aktivnog mulja se nalaze jedna pored druge i u neposrednom su kontaktu. Na taj način one utiču jedna na drugu i talože se po principu zonalnog taloženja, tipu 3, gde se formira front čestica, koji se spušta naniže i pravi jasnu razliku između gornjeg sloja bistre vode i donjeg sloja mulja, slika 4.12. Kako se čestice mulja približavaju dnu taložnika i pristižu jedna drugu, to one iz gornjih slojeva počinju da pritiskaju one u donjim i na taj način se javlja četvrti tip, stešnjenog ili kompresionog taloženja.



slika 4.12. Šematski prikaz zonalnog i kompresionog taloženja

Na taj način, taloženje u sekundarnom taložniku se mora posmatrati kao taloženje koje se odvija po dva mehanizma, koji se nadovezuju.

Kao ilustracija šta se odvija u sekundarnom taložniku tokom vremena, može poslužiti eksperiment u laboratorijskom cilindru za taloženje, slika 4.13. Istovremenim praćenjem linije fronta između izbistrene vode iznad i zone mulja ispod, koja se kreće naniže po dubini, u funkciji vremena taloženja, može se oformiti i dijagram prikazan na sledećoj šemi.

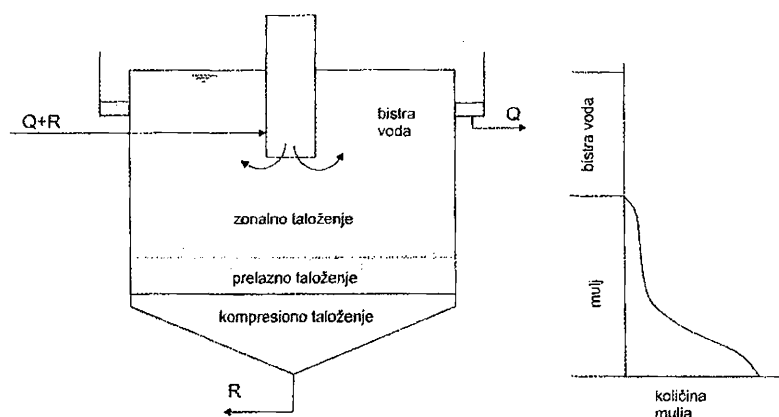


Slika 4.13. Šematski prikaz načina taloženja u sekundarnom taložniku

U početku, sve čestice su dovoljno rasute po zapremini cilindra i kako taloženje započne, uočava se sloj izbistrene vode na vrhu, potom sloj u kome su čestice mulja još uvek u koncentraciji suspenzije na početku, segment zonalnog taloženja *ZT*, a na dnu su čestice koje su već istaložene i koje su u neposrednom kontaktu, pa dolazi do stešnjenog ili kompresionog taloženja, *KT*. Između ova dva formirana sloja nalazi se sloj koji je mešavina prethodna dva tipa taloženja, pa se i označava kao prelazno taloženje, *PT*. Kako vreme dalje odmiče, sloj zonalnog taloženja nestaje, tako da se čestice talože samo u prelaznom i kompresionom režimu, da bi na kraju ostao samo sloj čestica koji se kompresiono taloži i sa vremenom smanjuje svoju zapreminu, usled sabijanja čitavog sloja.

Funkcionalna zavisnost pomeranja visine granice između izbistrene vode i sloja čestica, u funkciji od vremena, omogućava da se grafičkim metodama odredi potrebno vreme za taloženje čestica aktivnog mulja.

Sekundarni taložnici su najčešće kružnog oblika, a šematski izgled je dat na slici 4.14., koja pokazuje i koncentraciju čestica mulja u pojedinim zonama.



Slika 4.14. Sekundarni taložnik sa prikazanim tipovima taloženja

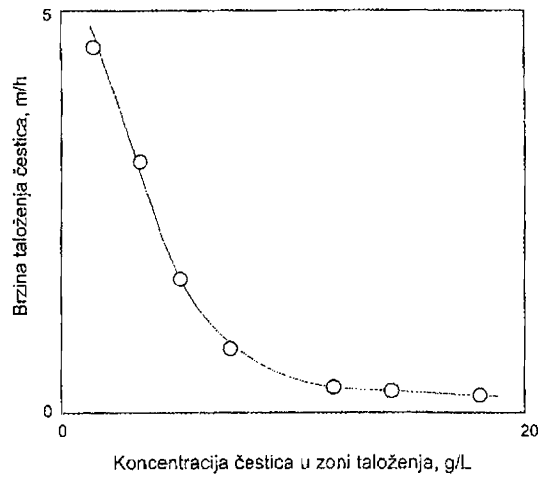
Dimenzionisanje sekundarnog taložnika je vezano za srednji dnevni protok otpadne vode. Međutim, pošto se može dogoditi da na postrojenje, u ekstremnim slučajevima, pristigne i nekoliko puta veći protok otpadne vode, to se uvek predviđa veći broj sekundarnih taložnika, koji će prikupiti taložne materije. U funkciji od protoka definiše se prečnik sekundarnog taložnika, pri čemu je njihova dubina u

granicama od 1,5 – 1,8 m za izbistrenu vodu i dela od 1,5 – 2,1 m za zonalno, prelazno i kompresiono taloženje.

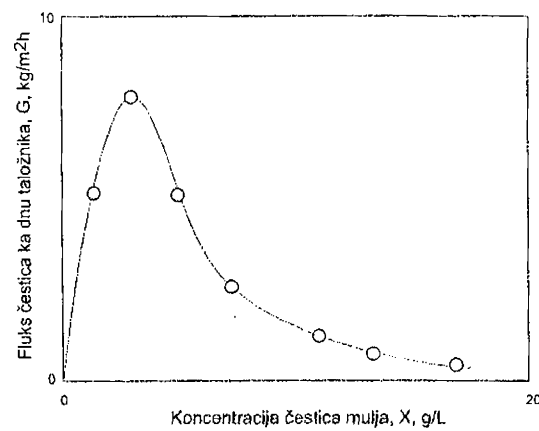
Proračun sekundarnog taložnika, kao i taložnika za ugušćavanje mulja se vrši na osnovu koncepta fluksa čvrstih čestica u taložniku. Fluks čvrstih (taložnih) čestica se definiše kao brzina zgušnjavanja čestica po jedinici površine taložnika u određenom vremenu i izražava se kao $kg/h \cdot m^2$. U sekundarnom taložniku se taloži aktivni mulj, koji je sastavljen od aktivne biomase, ćelijskih ostataka, dela bionerazgradivih organskih komponenti i inertnih čestica. Kako je u mulju sekundarnog taložnika dominantno prisutna biomasa, to će se u obeležavanju koncentracije čestica u taložniku koristiti ista oznaka kao i za aktivnu biomasu u aeracionom bazenu X . Koncentraciju čestica biomase u aktivnom mulju koja napušta aeracioni bazen je jednaka ulaznoj koncentraciji čestica u taložniku. Tokom zgušnjavanja čestica, one u sloju menjaju svoju koncentraciju od neke početne, X , do finalne koncentracije kojom izlaznom strujom na dnu, bivaju iznešene iz taložnika, X_w , koja predstavlja i koncentraciju čestica u recirkulacionoj struji koja se vraća u reaktor, X_r . Tokom prolaska kroz donji deo taložnika, u zoni kompresionog taloženja i iznošenja čestica izlaznom strujom, u jednom momentu se uspostavlja granična brzina kretanja čestica, tj. njihov granični fluks ka dnu taložnika.

U odnosu na vrednost tako dobijenog graničnog fluksa, strujom vode koja napušta aeracioni bazen u taložnik ne sme ući veća količina čestica od ove vrednosti, jer bi u tom slučaju došlo do nagomilavanja čestica u njemu i vremenom do prekida rada taložnika.

Da bi se izvršilo pravilno projektovanje sekundarnog taloženja, neophodno je izvršiti eksperiment, kako bi se dobili neophodni podaci za konkretan slučaj. Pošto je brzina zonalnog taloženja, V_0 , tj. pomeranja granice između izbistrena vode i ostatka mulja u funkciji koncentracija čestica u mulju, X , to je moguće napraviti eksperiment merenja brzine taloženja pri različitim koncentracijama čestica. Zonalna brzina taloženja opada sa povećanjem koncentracije čestica u suspenziji koja se taloži, kao što je i predstavljeno na slici 4.15.



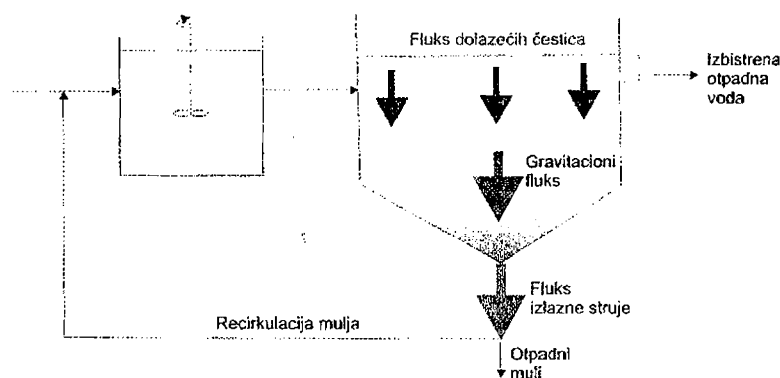
Slika 4.15. Zavisnost brzine taloženja čestica od koncentracije čestica sekundarnom taložniku



Slika 4.16. Promena fluksa čestica izazvanih gravitacijom

Istovremeno ako se prati fluks čestica, koji se dobija množenjem brzine kretanja čestica sa njihovom koncentracijom $\left(\frac{m}{h} \cdot \frac{kg}{m^3} = \frac{kg}{m^2 \cdot h}\right)$, slika 4.16., vidi se da fluks za određenu koncentraciju dostiže maksimum, a onda počinje da opada, što znači da će u uslovima velike koncentracije, u zoni kompresionog taloženja, fluks biti ograničen.

Međutim, kako se iz taložnika na dnu neprekidno odvodi mulj izlaznom strujom, to će i ona doprinosti fluksu čestica na dnu i mora se uzeti u obzir pri analizi ukupnog fluksa. Fluks čestica u sekundarnom taložniku mora biti dobro izbalansiran, jer ukoliko se na dnu taložnika, izlaznom strujom, ne odvodi dovoljna količina čestica, može doći do punjenja taložnika česticama iz dolazeće struje iz aeracionog bazena. Sa druge strane, ako se na dnu prekomerno poveća protok čestica izlaznom strujom, može se doći u situaciju da količina čestica koja se taloži sa vrha taložnika ka dnu bude smanjena, pa samim tim i količina čestica u recirkulacionoj struji, što se negativno odražava na proces u aeracionom bazenu. Iz ovoga je jasno da između koncentracije čestica i protoka pojedinih struja, postoji direktna veza, a za određivanje njihovih optimalnih vrednosti može poslužiti analiza flukseva čestica u sekundarnom taložniku. U taložniku postoji određeni granični fluks koji je potrebno uspostaviti, kako bi se zadovoljila oba uslova i da u recirkulacionoj struji bude dovoljna koncentracija čestica pri određenom protoku recirkulacione struje i da iz aeracionog bazena dolazi dovoljna količina čestica koja će uspeti da se staloži u taložniku za određeno vreme, u uslovima zonalnog i kompresionog taloženja, kao što je pokazano na slici 4.17.



Slika 4.17. Fluksevi čestica u sekundarnom taložniku

Na bilo kom nivou u taložniku fluks čestica se računa kao:

$$G_s = X \cdot V_t \quad 4.131$$

G_s fluks čestica izazvan gravitacijom, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$

X koncentracija čestica, $\frac{g}{m^3}$

V_t brzina taloženja pri stešnjenom taloženju, $\frac{m}{h}$

Istovremeno fluks čestica koji je proizveden isticanjem struje mulja na dnu taložnika je:

$$G_b = X \cdot V_b \quad 4.132$$

G_b fluks taložnog sloja čestica

V_b brzina kretanja istaloženog sloja na dnu taložnika usled oticanja

Ukupan fluks izazvan gravitacijom i kretanjem taložnog sloja, koji dodatno vuče čestice ka dnu je:

$$G_t = G_s + G_b = X \cdot V_t + X \cdot V_b \quad 4.133$$

G_t ukupan fluks svih čestica u taložniku

Brzina kojom se kreću čestice u istaloženom sloju na dnu se izračunava kao odnos izlaznog protoka i površine taložnika, pa je:

$$V_b = \frac{Q_w}{A} \quad 4.134$$

V_b brzina kojom se kreće taložni sloj čestica, $\frac{m}{h}$

Q_w protok kojim mulj otiče iz taložnika, $\frac{m^3}{h}$

A površina taložnika, m^2

Maseni protok čestica u taložniku je:

$$M_t = Q_0 \cdot X = Q_w \cdot X_w \quad 4.135$$

M_t maseni protok čestica, $\frac{kg}{h}$

Q_0 protok influenta u taložnik, $\frac{m^3}{h}$

X koncentracija čestica u influentu, $\frac{g}{m^3}$

Q_w protok izlazne struje mulja iz taložnika, $\frac{m^3}{h}$

X_w koncentracija čestica u izlaznoj struji mulja, $\frac{g}{m^3}$

Ako se poznaje granični fluks čestica ka dnu taložnika, G_L , onda je najmanja zahtevana površina taložnika:

$$A = \frac{M_t}{G_L} = \frac{Q_0 \cdot X}{G_L} \quad 4.136$$

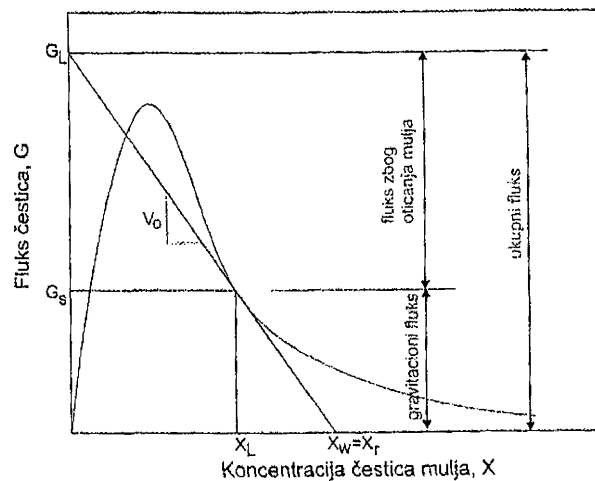
Za određeni maseni fluks čestica i željenu koncentraciju čestica u izlaznoj struji na dnu taložnika, moguće je odrediti protok izlazne struje:

$$Q_w = \frac{M_t}{X_w} \quad 4.137$$

U tom slučaju, brzina kretanja mulja u zoni kompresionog taloženja je:

$$V_b = \frac{Q_w}{A} = \frac{M_t}{X_w A} = \frac{G_L}{X_w} \quad 4.138$$

Ovi odnosi su dati na slici 4.18. Kada se odabere željena vrednost koncentracije čestica u izlaznoj struji X_w , povlačenjem tangente na krivu zavisnosti fluksa čestica od koncentracije, u preseku sa y osom se dobija vrednost granične vrednosti fluksa čestica, G_L . Nagib tangente odgovara vrednosti brzine kretanja sloja na dnu taložnika, V_b . Tačka dodira tangente na krivoj odgovara vrednosti fluksa izazvanog silom gravitacije, a razlika $G_L - G_s$, odgovara fluksu koji je izazvan oticanjem izlazne struje iz taložnika.



Slika 4.18. Određivanje vrednosti graničnog fluksa u sekundarnom tačložniku

Test sa cilindrom, u prethodno definisanom eksperimentalnom ispitivanju taloženja, može da posluži za određivanje površine potrebne za zonalno taloženje, na drugačiji način. Merenjem vremena pomeranja međufazne površine po dubini, dobijaju se podaci predstavljeni na slici 4.19, koji imaju za cilj da se odredi ukupno potrebno vreme da se određena zona čestica duž taložnika spusti do nivoa koji zauzima mulj u taložniku. Sa slike se vidi da nakon nekog vremena počinje uticaj zgušnjavanja zone mulja na brzinu kretanja granične površine, tako što je usporava. Ako se ukupno vreme, potrebno da se na dnu dostigne željena koncentracija X_w označi sa t_w onda se ono može odrediti interpolacijom, kao da tog negativnog uticaja i nema.

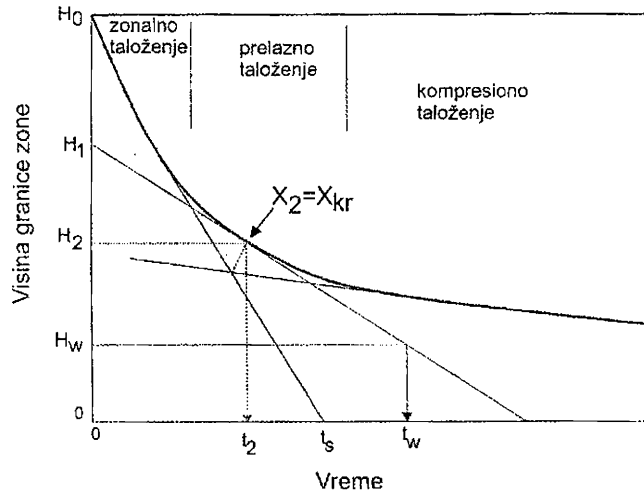
Ovako određeno t_w predstavlja ono vreme za koje bi se granična površina spustila do željene dubine u taložniku, kada se ne bi javili efekti ometanja taloženja nakon određene dubine, usled povećane koncentracije čestica i kompresionog taloženja.

Ukoliko se poznaje vreme t_w , moguće je odrediti površinu potrebnu za bistrenje:

$$A = \frac{Q_0 \cdot t_w}{H_0} \quad 4.139$$

A površina potrebna za zonalno taloženje, m^2

Q_0 ukupan protok otpadne vode, m^3/s
 t_w vreme postizanja željene koncentracije čvrste faze, s
 H_0 početna visina međufazne površine, m



Slika 4.19. Određivanje potrebnog vremena taloženja

Polazeći od materijalnog bilansa čestica tokom taloženja:

$$XH_0A = X_wH_wA \quad 4.140$$

X početna koncentracija čestica u suspenziji sa visinom H_0 , mg/L
 H_0 početna visina suspenzije, mm
 X_w koncentracija čestica u suspenziji visine H_w , koja u sebi sadrži svu čvrstu fazu, nakon taloženja, mg/L
 H_w visina sloja suspenzije sa čvrstom fazom, mm

može se dobiti:

$$H_w = \frac{XH_0}{X_w} \quad 4.141$$

Poznavanjem vrednosti H_w , moguće je grafički odrediti ukupno vreme taloženja, t_w , kao što je i pokazano na slici 4.19.

Pri stešnjenom taloženju čestice su u međusobnom kontaktu i jedna na drugu utiču tako što gornji sloj čestica pritiska onaj sloj ispod i tako u pravcu taloženja dolazi do sabijanja (stešnjavanja) čestica na putu

naniže, kao i u zoni formiranog mulja. Potrebna zapremina taložnika u zoni stešnjelog taloženja se određuje eksperimentalno, a brzinu sleganja mulja u zoni stešnjelog taloženja moguće je izračunati po korelaciji:

$$-\frac{dH_t}{dt} = K(H_t - H_\infty) \quad 4.142$$

H_t debljina sloja mulja u bilo kom trenutku vremena, m

H_∞ debljina sloja mulja nakon dovoljno dugog vremena taloženja, m

K konstanta koja odgovara određenoj suspenziji koja se taloži

Ako se gornja jednačina integrali u okviru dva vremenska intervala, kojima odgovaraju određene debljine slojeva mulja, H_{t_1} i H_{t_2} , dobija se:

$$-\int_{H_{t_1}}^{H_{t_2}} \frac{dH_t}{(H_t - H_\infty)} = K \int_{t_1}^{t_2} dt \quad 4.143$$

$$\ln \left(\frac{H_{t_1} - H_\infty}{H_{t_2} - H_\infty} \right) = K(t_1 - t_2) \quad 4.144$$

$$H_{t_1} - H_\infty = (H_{t_2} - H_\infty) \cdot e^{K(t_1 - t_2)} \quad 4.145$$

odakle je moguće izračunati debljinu sloja mulja nakon dovoljno dugog vremena taloženja, H_∞ .

Pri jakom mešanju u zoni stešnjelog taloženja dolazi do kidanja flokula i „oslobađanja“ vode, čime se mulj ugušćava. U tu svrhu, najčešće se koriste mehaničke grabulje u samim taložnicima.

Projektovanje sekundarnog taložnika se zasniva na određivanju brzine kojom se bistri voda u njemu iz aeracionog bazena, odnosno određuju se prelivna brzina vode i izlazna brzina mulja iz taložnika. Izračunava se i potrebna geometrija taložnika za radne uslove kao i koncentracija suspendovanih materija koja može biti dostignuta u povratnoj struji za aeracioni bazen.

4.4. Biofiltracija

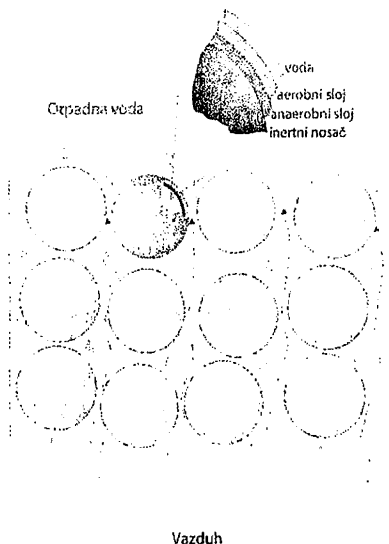
Prečišćavanje otpadne vode sa imobilisanim slojem mikroorganizama na inertnom nosaču, tzv. aerobna biofiltracija, je postupak koji se uglavnom koristi za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda manjih naselja i za prethodnu obradu pojedinih industrijskih otpadnih voda. Aerobni biofiltri su stariji postupak od prečišćavanja aktivnim muljem, ali su zbog svojih nedostataka, pre svega u pogledu izgradnje i manipulacije, bili potisnuti sistemima sa aktivnim muljem. Mogućnost ugradnje novih, plastičnih inertnih nosača, dolazi do ponovnog rasta primene biofiltera. Biofiltri nisu filtri u pravom smislu reči, već je njihova uloga da formiraju što veću specifičnu površinu radi kontakta otpadne vode i vazduha sa biofilmom. Od postupaka aerobne biofiltracije, danas su najčešće primenjeni kapajući biofiltri (*trickle bed* reaktori) i biodiskovi.

4.4.1. Kapajući biofiltri

Razlika ovog postupka u odnosu na aktivni mulj je u mehanizmu transporta organske materije i kiseonika, koja je ograničena prenosom mase kroz međufaznu površinu između biofilma i vode koja se po njemu sliva.

U procesu rasta mikroorganizama imobilisanih na nosačima, mikroorganizmi odgovorni za konverziju organske materije i nutrijenata u otpadnim vodama su imobilisani na inertne nosače, u vidu biofilмова. Vazduh difunduje kroz sloj otpadne vode koji obliva biofilm, zajedno sa organskim zagađenjem, koje iz sloja vode dospeva u biofilm, kao što je pokazano na slici 4.20.

Nosači mikroorganizama mogu biti kamen, šljunak, pesak, šljaka i u širokom opsegu plastični i drugi sintetski materijali. Tip i veličina nosača su glavni faktori koji utiču na performanse i operativne karakteristike ovakvih sistema, koji se međusobno razlikuju po karakteristikama pakovanja i odnosu ulaznog i izlaznog protoka.

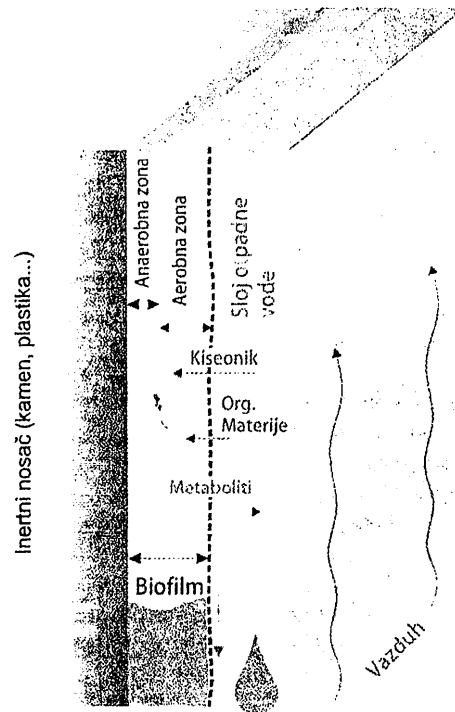


Slika 4.20. Šematski prikaz sloja kapajućeg biofiltra

Uklanjanje supstrata se dešava unutar samih biofilmova, slika 4.21. U zavisnosti od uslova rasta i hidrodinamike sistema debljina biofilma se kreće od $100 \mu m$ do $10 mm$. Nepokretni sloj tečnosti (difuzioni sloj) odvaja biofilm od mase tečnosti, koja se kreće po površini biofilma ili se meša sa spoljašnje strane nepokretnog filma. Biorazgradivi organski materijal (BOD) kao i amonijum jon (NH_4^+), ako je prisutan u vodi, prolazi kroz biofilm i biva oksidovan i asimilovan od strane ćelija i na taj način se uklanja iz mase tečnosti. Mikroflora u biofilmu koristi tu organsku materiju za svoj metabolizam i debljina biofilma, usled nastajanja novih ćelija postepeno raste. Supstrat, kiseonik i nutrijenti difunduju kroz nepokretan sloj tečnosti do biofilma, a produkti biodegradacije (metaboliti) iz biofilma kroz nepokretan sloj tečnosti difunduju u masu tečnosti, kao što je predstavljeno na sledećoj šemi. Supstrat difunduje od površine biofilma ka njegovoj unutrašnjosti, gde se i troši, što za posledicu ima opadanje koncentracije supstrata S , sa dubinom filma. Kao rezultat ovoga, kaže se da je proces limitiran difuzijom, odnosno brzina uklanjanja supstrata zavisi od brzine difuzije. Koncentracija supstrata i kiseonika unutar biofilma je manja nego u masi tečnosti i smanjuje se sa dubinom biofilma i brzinom njihovog iskorišćenja. Aerobna zona biofilma, odnosno dubina fiksiranog sloja mikroorganizama do koje dopire kiseonik, je ograničena na oko 50 do $100 \mu m$. Ostali deo biofilma do površine nosača je u anaerobnoj zoni, do

koje ne dopire kiseonik i u koju dospeva samo neznatan deo organske materije, tako da je mikroflora u anaerobnoj zoni, pogotovo uz sam nosač, u fazi intenzivne endogene respiracije. To dovodi do smanjenja sposobnosti pričvršćivanja, odnosno lepljenja sloja ćelija na površinu nosača, a samim tim i do odvajanja i spiranja biofilma, nakon čega, na oslobođenoj površini, započinje formiranje novog sloja mikroorganizama, čime se regeneriše i obnavlja prisutna biomasa u biofiltru. Spiranje biofilma zavisi od hidrauličkog i organskog opterećenja biofiltra.

Sami slojevi biofilma nisu tako jednostavni kao što je prikazano na šemi, već su zapravo kompleksne neuniformne strukture. Biomasa može biti veoma gusta u biofilmu, a takođe može varirati u gustini i debljini. Uniformni rast mikroorganizama na nosačima se takođe ne dešava zbog povremenog skidanja biomase sa nosača usled uticaja hidrodinamičkih sila koje otiru deo sloja sa inertnih čestica.



Slika 4.21. Slojevi biofilma i materijalni tokovi pri biofiltraciji

Kod aerobnog procesa sa suspendovanim mikroorganizmima koncentracije rastvorenog kiseonika od 2 do 3 mg/L se smatraju dovoljnim za njegovo odvijanje, međutim u procesima sa biofilmovima ove koncentracije kiseonika mogu biti limitirane usled ograničenog intenziteta prenosa mase kiseonika iz vazduha koji struji oko biofilma i samog biofilma. Ovo je posebno izraženo kod procesa nitrifikacije koji zahtevaja prisustvo veće količine rastvorenog kiseonika. Sa druge strane, u sistemima sa imobilisanim mikroorganizmima u biofilmovima, ograničena difuzija može da ima i svoje prednosti, kod procesa uklanjanja azota. Sporija difuzija kiseonika, može da omogući stvaranje anaerobnog sloja unutar biofilma i time omogući odigravanje oba procesa i nitrifikacije i denitrifikacije u ovakvim sistemima.

Kapajući biofiltri su često primenjivana alternativa procesu aktivnog mulja, za manje protoke otpadne vode, zbog manjih operativnih troškova i jednostavnijeg rada, ali im je manja i efikasnost uklanjanja zagađenja.

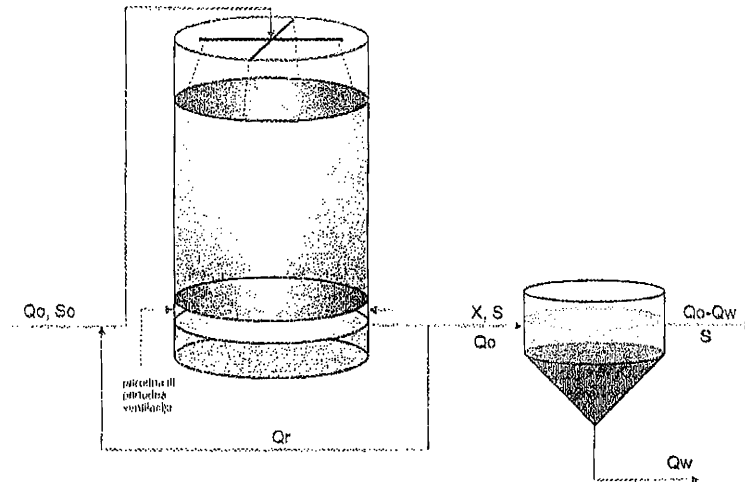
Konstruktivno se izvodi kao toranj sa dubokim slojem nosača, ispune biofiltera, velike propustljivosti, na čijoj površini se formira tanak sloj imobilisanih mikroorganizama, biofilm, slika 4.22. Raspršivanjem vode po vrhu ispune i njenim slivanjem (kapanjem) preko biofilma kroz ispunu, dolazi do opisanih fenomena prečišćavanja otpadne vode, da bi pri prolazu kroz ceo sloj ispune, bio postignut željeni stepen prečišćavanja. Na dnu tornja sa ispunom se nalazi sabirni rezervoar, iz koga se voda odvodi do sekundarnog taložnika.

Doziranje otpadne vode po vrhu ispune, najčešće se vrši raspršivanjem iz seta mlaznica ili što je češći slučaj putem rotirajućih jedno ili višekrakih distributera, sa mlaznicama na dnu, sa kojih se voda raspršava po površini ispune po čitavom poprečnom preseku tornja. Biofiltri sa šljunkovitom ispunom su obično, zbog težine ispune, plići ali sa većim prečnikom, dok su biofiltri sa plastičnom ispunom dublji ali manjeg prečnika.

Kada je ceo sloj inertnog punjenja potpuno potopljen u vodu onda se može izvoditi i anaeroban postupak, a u novije vreme, se koriste imobilisani mikroorganizmi za razvoj različitih sistema. Osnovna karakteristika ovakvih inovativnih rešenja sistema je velika i kontrolisana kontaktna površina između biofilma i vode.

Projektovanje postrojenja za biološku filtraciju se bazira na empirijskom, semi-empirijskom konceptu i bilansiranju masa koje ulaze u sistem.

Razvijene su matematičke jednačine za procenu efikasnosti uklanjanja organskog, *BOD*, zagađenja na bazi karakteristika sistema kao što su visina ispune, vrsta ispune, stepen recirkulacije, temperatura i opterećenje.



Slika 4.22. Biofilter sa sekundarnim taložnikom

Kada se proces odvija kao aerobna biofiltracija, jedan od važnih parametara je količina vazduha, odnosno kiseonika, koju je moguće dovoditi u biofilter pri određenom padu pritiska kroz filtersku ispunu. Vazduh može prolaziti kroz filter prinudnom ventilacijom, pomoću ventilatora ili ponekad i prirodnom, konvektivnom ventilacijom (promajom). Da bi se odredio način dovođenja kiseonika u filter, neophodno je poznavati količinu kiseonika koju je potrebno obezbediti. Na osnovu empirijskih istraživanja, efikasnosti potrošnje kiseonika po količini organskog zagađenja, proizvođači filterske ispune sami preporučuju. Tako se najčešće usvaja vrednost od $\eta = 5\%$, odnosno maseni utrošak od $\eta_m = 20 \text{ kg } O_2/\text{kg } BOD$. Na taj način potrebna količina kiseonika se računa po jednačini:

$$R_0 = \eta_m \cdot \left(0,80e^{-0,17L_0} + 1,2e^{-0,17L_0} \right) \cdot PF \quad 4.146$$

- R_0 količina potrebnog kiseonika, $\text{kg } O_2/\text{kg } BOD$
- η_m masena efikasnost potrošnje kiseonika, $\text{kg } O_2/\text{kg } BOD$
- L_B zapreminsko napajanje filtra organskim zagađenjem, $\text{kg } BOD/\text{m}^3 d$

PF odnos maksimalnog prema srednjem zapreminskom napajanju filtra

Na osnovu masene potrošnje kiseonika, moguće je izračunati zapreminu potrebnog vazduha, na normalnim uslovima, koristeći jednačinu:

$$AR_{20} = \frac{R_0 \cdot Q \cdot S_0}{\rho_v \cdot x_{O_2}} \quad 4.147$$

AR_{20} potrebna zapremina vazduha, m^3/h

Q protok otpadne vode, m^3/h

S_0 koncentracija organskog zagađenja u influentu, $kg\ BOD/m^3$

ρ_v gustina vazduha, na normalnim uslovima $1,204\ kg/m^3$

x_{O_2} maseni udeo kiseonika u vazduhu, $0,2318\ kg\ O_2/kg\ vazduha$

Pošto se često uslovi na kojima se odigrava proces biofiltracije razlikuje od standardnih, potrebno je to i uzeti u obzir, pa je potrošnja vazduha na radnim uslovima, AR_T , jednaka:

$$AR_T = AR_{20} \left(\frac{273,15 + T_A}{293,15} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_H} \right) \quad 4.148$$

T_A temperatura ambijenta u kome se nalazi biofilter, $^{\circ}C$

P_H pritisak na koti postrojenja, kPa

Za temperature iznad $20\ ^{\circ}C$ preporučuje se da se, za svaki stepen iznad $20\ ^{\circ}C$, potrebna količina vazduha uveća za 1%, pa je:

$$AR_{T>20^{\circ}C} = AR_T \left(1 + \frac{T_A - 20}{100} \right) \quad 4.149$$

Pad pritiska vazduha pri prolazu kroz biofilter se računa po jednačini:

$$\Delta P = N_p \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad 4.150$$

ΔP pad pritiska kroz biofilter, kPa

N_p zbir svih otpora proticanju vazduha kroz ispunu biofiltra,

v površinska brzina proticanja vazduha u filterskom tornju, m/s

Zbir svih otpora se računa po jednačini:

$$N_p = 10,33 \cdot H \cdot e^{(1,36 \cdot 10^{-5})(L/A)} \quad 4.151$$

H visina ispune filtra, m

L/A opterećenje biofiltra tečnom fazom, kg/h

Kroz biofilter, otpadna voda i vazduh prolaze suprotnostrujno, tako da je potrebno znati neku srednju vrednost temperature na kojoj se proces prenosa mase kiseonika iz vazduha u vodu obavlja. Naime, najčešće temperatura vazduha i vode nije jednaka. Voda proticanjem sa vrha do dna ispune menja temperaturu, kao i vazduh od dna ka vrhu. Na taj način se kao reprezentativna temperatura, uzima srednja logaritamska temperatura:

$$T_m = \frac{(T_{otp.vode} - T_{vaz})}{\ln \frac{T_{otp.vode}}{T_{vaz.}}} \quad 4.152$$

Kod prirodne ventilacije, pad pritiska vazduha koji struji naviše kroz sloj ispune, izražen u $mm H_2O$, se računa po jednačini:

$$\Delta P_{pv} = 353 \cdot \left(\frac{1}{T_{hladan\ kraj}} - \frac{1}{T_{topli\ kraj}} \right) H \quad 4.153$$

Za projektovanje bioloških filtera sa ispunom od kamena najčešće se koristi tzv. *NRC* formula (*National Research Council, SAD*), razvijena još tokom Drugog svetskog rata.

$$E_s = \frac{100}{1 + C \cdot \sqrt{\frac{W}{V \cdot F}}} \quad 4.154$$

E_s efikasnost biofiltra, %

W napajanje biofiltra organskim zagađenjem u toku dana, $kg BOD/d$

V zapremina kamene ispune u biofiltru, m^3

F recirkulacioni faktor, ili broj prolazaka određene količine vode kroz filter

C konstanta, 0,443

Broj efektivnih prolazaka određene količine vode kroz biofilter se računa po jednačini:

$$F = \frac{1 + \frac{R}{Q}}{\left(1 + 0,1 \cdot \frac{R}{Q}\right)^2} \quad 4.155$$

$\frac{R}{Q}$ recirkulacioni odnos, sa vrednostima od 1 do maksimum 8

U slučajevima kada se radi dvostepena biofiltracija, do drugog filtra obično dospevaju teže biorazgradiva zagađenja, koja je takođe neophodno razgraditi, pa se njegova efikasnost računa po jednačini:

$$E_{s2} = \frac{100}{1 + \frac{C}{1 - E_{s1}} \cdot \sqrt{\frac{W_2}{V_2 \cdot F_2}}} \quad 4.156$$

E_{s2} efikasnost drugog biofiltra, %

W_2 napajanje drugog biofiltra (izlaz iz prvog) organskim zagađenjem u toku dana, $kg\ BOD/d$

V_2 zapremina kamene ispune u drugom biofiltru, m^3

F_2 recirkulacioni faktor, ili broj prolazaka određene količine vode kroz drugi filter

C konstanta, 0,443

Za projektovanje bioloških filtera sa plastičnom ispunom najčešće se koriste empirijske jednačine koje su vremenom i modifikovane, kako su prikupljeni novi eksperimentalni podaci na različitim postrojenjima. Najčešće se polazi od jednačine koja predstavlja ekspanencijalnu funkciju uklanjanja organskog opterećenja:

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{-\frac{k_{20} H_{bf}}{q^n}} = e^{-\left(\frac{Q}{A_{bf}}\right)^n} \quad 4.157$$

S_e BOD efluenta, mg/L
 S_i BOD influenta, mg/L

$k_{20^\circ C}$ koeficijent pakovanja filtra na $20^\circ C$, $\frac{\sqrt{L/s}}{m^2}$

q ulazni zapreminski protok, $\frac{L}{m^2 \cdot s}$

H_{bf} visina ispune biofiltra, m

A_{bf} površina poprečnog preseka filtra, m^2

Q protok otpadne vode, L/s

n empirijska konstanta zavisna od vrste ispune filtra, ($= 0,5$)

Prečnik filtra se određuje na osnovu njegove površine, pri čemu se površina nalazi iz odnosa protoka otpadne vode, Q (L/s) i fluksa proticanja otpadne vode kroz filter, q ($L/m^2 \cdot s$).

Fluks otpadne vode kroz biofilter se izračunava po jednačini:

$$q = \left[\frac{kH_{bf}}{\ln\left(\frac{S_0}{S}\right)} \right]^{1/n} \quad 4.158$$

k koeficijent pakovanja filtra, $\frac{\sqrt{L/s}}{m^2}$,

S_0 ulazna koncentracija supstrata, BOD zagađenja, mg/L

S izlazna koncentracija supstrata, BOD zagađenja, mg/L

Kako su sve primenjene jednačine empirijskog karaktera, razvijene za visinu ispune filtra od $6,1 m$ i zapreminsko opterećenje ispune filtra od $150 g BOD/m^3$, to je za prelazak na druge dimenzije biofiltra potrebno izvršiti korekciju za vrednost konstante karakteristika biofiltra, k :

$$k_2 = k_{st} \sqrt{\frac{H_{bf,st}}{H_{bf2}}} \cdot \sqrt{\frac{S_{st}}{S_2}} \quad 4.159$$

- k_{st} koeficijent pakovanja filtra, tabelarna vrednost za određenu
 otpadnu vodu, $\frac{\sqrt{L/s}}{m^2}$
- S_{st} koncentracija supstrata pri uslovima za koje su dobijene
 empirijske jednačine, 150 g/m^3
- S_2 koncentracija supstrata u realnim uslovima, g/m^3

Ovu vrednost je potrebno korigovati, shodno temperaturi predmetne
 otpadne vode u odnosu na standardne uslove od 20°C , pa je:

$$k_T = k_{20} (1,035)^{T-20} \quad 4.160$$

Sa poznatom vrednošću fluksa otpadne vode kroz biofilter moguće je
 odrediti brzinu distributora, otpadne vode po površini biofiltra:

$$u_{distr} = \frac{(1+R)q}{n_k \cdot H_{L, dbf}} \quad 4.161$$

- u_{distr} brzinu distributora otpadne vode po površini biofiltra, *obrt/min*
 R recirkulacioni odnos,
 q hidrauličko opterećenje filtra, $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
 n_k broj krakova dozera,
 $H_{L, dbf}$ visina tečnosti na vrhu biofiltra koja bi bila dozirana pri jednom
 okretu dozatora, *mm/rotaciji*

Pri istovremenom uklanjanju *BOD* i nitrifikaciji u biofiltru, može se
 definisati specifična brzina uklanjanja azota, $R_n \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right)$, korišćenjem
 korelacije koja važi u temperaturnom opsegu od $9 - 20^\circ\text{C}$:

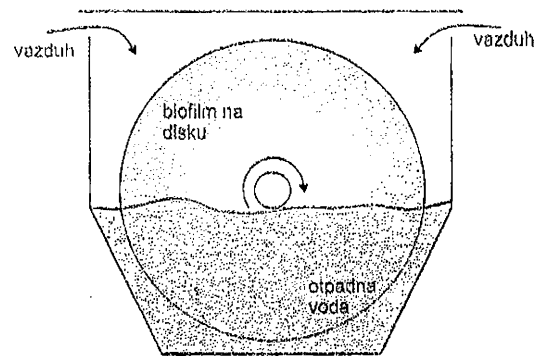
$$R_n = 0,82 \left(\frac{BOD}{TKN} \right)^{-0,44} \quad 4.162$$

gde su *BOD* i *TKN* koncentracije ugljeničnog i azotnog organskog
 zagađenja, respektivno.

Primena biofiltera u biološkom delu tretmana otpadnih voda, zahteva proračune za posmatrane uslove rada sistema u koje ulaze određivanje geometrije biofiltera, količine potrebnog punjenja, padova pritiska, brzine biofiltracije, odnosno brzine doziranja vazduha i otpadne vode na biofilter.

4.4.2. Biodisk proces

Po mehanizmu uklanjanja zagađenja iz otpadne vode, ovaj postupak je sličan biofiltru, s tim što je biofilm nanet na mrežastu površinu u obliku tankih diskova koji su nanizani na centralno postavljenu osovinu, slika 4.23. Broj diskova i njihova površina određuju površinu kontakta. Tako poređani diskovi su potopljeni do određenog nivoa, obično nešto ispod polovine površine diska u otpadnu vodu. Sporim rotiranjem biofilm se nalazi u kontaktu sa vodom, pri čemu se vrši transport organske materije iz vode ka biofilmu. Izronjavanjem dela površine diska iznad nivoa vode, stvaraju se uslovi za transport kiseonika iz vazduha ka biofilmu, čime je omogućen proces oksidacije.



Slika 4.23. Šematski prikaz procesa biofiltracije na biodisku

Najčešća primena ovog procesa je u prečišćavanju sanitarnih otpadnih voda, kao i u obradi pojedinih vrsta industrijskih otpadnih voda. Tipična instalacija je od 5 do 20 metara dužine. Pri proračunu ove vrste procesa proračunava se brzina obrtanja diskova i njihova ukupna površina.

Proračun vezan za biodiskove se svodi na izračunavanje osnovnih parametara poput hidrauličkog opterećenja, organskog opterećenja i potrebne površine za prečišćavanje otpadne vode.

Za izračunavanje promene koncentracije po grupama biodiskova koristi se jednačina:

$$S_n = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,00974 \cdot \frac{A_s}{Q} \cdot S_{n-1}}}{2 \cdot 0,00974 \cdot \frac{A_s}{Q}} \quad 4.163$$

S_n koncentracija supstrata na n-toj grupi biodiskova, $\frac{g}{m^3}$

$\frac{A_s}{Q}$ odnos površine grupe biodiskova prema zapreminskom protoku

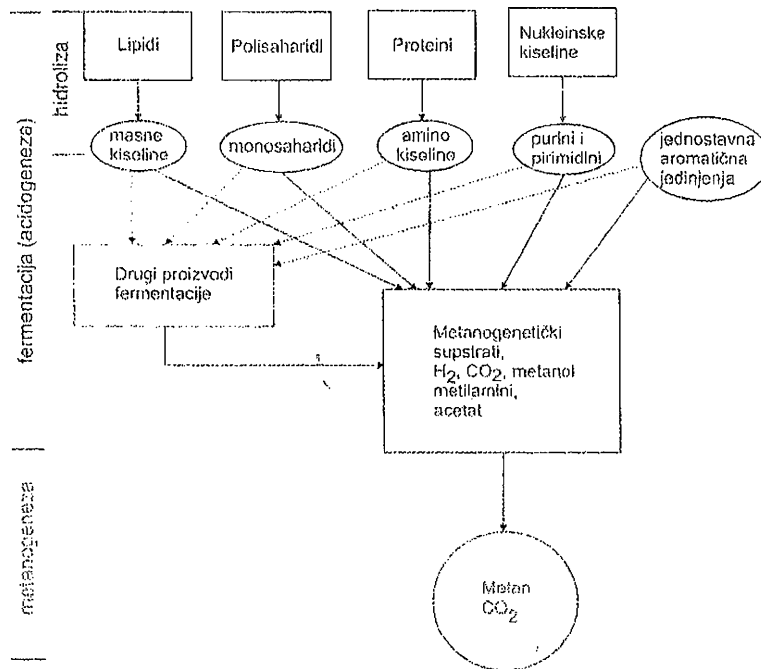
vode, $\frac{d}{m}$

4.5. Anaerobni tretman otpadnih voda

Biohemijske transformacije organskih materija, tj. organskih zagađenja do kojih dolazi u toku anaerobne obrade, uslovljene su fiziološkim karakteristikama radnih mikroorganizama. Osnovna zajednička karakteristika bakterija anaerobnog vrenja jeste sposobnost transformisanja materije i energije u odsustvu kiseonika.

Faze anaerobnog procesa

Pod dejstvom bakterija anaerobnog vrenja, složene supstance, kao što su belančevine, lipidi, škrob, celuloza, lignin itd., razlažu se složenim putem koji se može podeliti u tri faze, kao što je to šematski prikazano na slici 4.24.



Slika 4.24. Šematski prikaz faza anaerobne razgradnje organskog zagađenja u otpadnoj vodi

U prvoj fazi razgradnje, složene, u vodi nerastvorne supstance, hidrolizom se prevode u rastvoran oblik. Ova hidroliza je katalizovana enzimima koje izlučuju u okolni prostor bakterije anaerobnog vrenja. Pošto se u ovoj fazi razgradnje, u vodi nerastvorne supstance prevode u rastvoran oblik, ona se često naziva fazom likvefakcije, rastvaranja ili utečnjavanja.

Prevođenje složenih supstanci u oblik rastvoran u vodi je neophodan uslov za dalju razgradnju, jer mikroorganizmi mogu potpuno razložiti samo onaj oblik hrane koji je rastvoran u vodi. Na žalost, u praktičnim uslovima, rastvaranje složenih organskih supstanci retko kada je potpuno, zbog čega iz postupka obrade uvek izlazi manja ili veća količina nerazgrađene organske supstance. Takav je, na primer, lignin koji se razlaže veoma sporo i nepotpuno; produkti njegove razgradnje ulaze u sastav mulja koji se izdvaja iz biološkog reaktora čineći kasnije osnovne komponente humusa u zemljištu.

U drugoj fazi razlaganja bakterije kiselinskog vrenja koriste u vodi rastvorne komponente organskog zagađenja, bez obzira da li su unete u sistem ili nastale u prvoj fazi razlaganja i prevode ih u svoju biomasu i različite metabolite. Razumljivo je da se pod uticajem bakterija kiselinskog vrenja većom brzinom razlažu one komponente zagađenja koje su prisutne u rastvornom obliku jer ne moraju proći kroz prvu fazu razlaganja, tj. hidrolizu.

Pri razlaganju pod dejstvom bakterija kiselinskog vrenja ne postoji spoljašnji akceptor elektrona oslobođenih razlaganjem supstrata, pa bakterije moraju koristiti unutrašnje akceptore koji nastaju u metaboličkim tokovima, na primer, ketokiseline. Pošto je najčešće zastupljeno korišćenje ketokiselina kao krajnjih akceptora elektrona, logično je što se kao krajnji produkt kiselinskog vrenja, tj. druge faze razlaganja javljaju različite organske kiseline. Pored toga, nastaju i određene količine CO_2 i H_2 , kao i novoizgrađena biomasa mikroorganizama. Upravo zbog toga što se kao masovan produkt ove faze razlaganja organskih supstanci javljaju organske kiseline, ona se naziva fazom kiselinskog vrenja.

Vrste, kao i količine nastalih kiselina zavise od brojnih faktora, a pre svega od: vrste organskog zagađenja, pH , temperature, koncentracije kiseonika, itd. Ova faza razlaganja se može odvijati u prisustvu i bez prisustva kiseonika, pošto su bakterije kiselinskog vrenja fakultativno aerobne.

Zavisno od hemijske prirode, u drugoj fazi razlaganja se različita jedinjenja razlažu različitim brzinama. Najbrže i praktično potpuno se razlažu ugljeni hidrati, dok se više masne kiseline razlažu znatno sporije i na kraju ih zaostaje oko 20 % u nerazloženom obliku.

Treća faza razlaganja dešava se pod dejstvom bakterija metanskog vrenja i u njoj se, prethodno formirane organske kiseline razlažu u metan i ugljen-dioksid uz biosintezu određene količine bakterijske biomase. Pored organskih kiselina, bakterije metanskog vrenja mogu razlagati, tj. koristiti kao hranu, i neka druga jedinjenja kao, na primer, niskomolekularne alkohole. One, takođe, koriste i H_2 , a pri tome CO_2 služi kao akceptor elektrona. Produkti ove transformacije su CH_4 i H_2O .

Sva, ili skoro sva postrojenja za anaerobnu obradu funkcionišu tako da se sve tri faze razlaganja organskih supstanci odvijaju sukcesivno u istom bioreaktoru. Zbog značajne razlike u fiziološkim osobinama između bakterija kiselinskog i metanskog vrenja u takvim bioreaktorima nije moguće postići optimalne uslove funkcionisanja mikroflore. Jedan od načina da se ovi problemi reše je razdvajanje sredine u kojoj deluju ove dve vrste mikroorganizama, što sa druge strane povećava ukupne troškove prerade otpadnih voda.

4.5.1. Brzina odvijanja anaerobnog procesa

U anaerobnim procesima dva pojma granične brzine su važna: (1) brzina odvijanja hidrolize i (2) brzina iskorišćenja rastvorenog supstrata za fermentaciju i metanogenezu. Hidroliza koloidnih i čvrstih čestica ne utiče na odvijanje procesa i stabilnost, ali utiče na ukupnu količinu transformisanih čestica. U anaerobnom procesu digestije, koji se koristi za gradski otpadni mulj, potrebno je vreme zadržavanja veće od 30 dana za konverziju gotovo celokupne količine čestica.

Kinetika iskorišćenja rastvorenog supstrata je od velikog interesa za razvijanje stabilnog anaerobnog procesa.

Zbog relativno male promene slobodne energije anaerobnih reakcija, koeficijenti proizvoda rasta su znatno niži nego odgovarajuće vrednosti za aerobnu oksidaciju. Tipičani koeficijenti proizvoda sinteze i endogenog raspadanja za fermentaciju i metanogenezu anaerobnih bakterija su $Y = 0,10$ i $0,04 \text{ g VSS/g VSS}$ i $k_d = 0,04$ i $0,02 \text{ g VSS/g VSS} \cdot d$, respektivno.

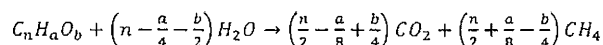
Za praćenje stabilnosti rada anaerobnih bioreaktora može poslužiti koncentracija isparljivih masnih kiselina, *VFA*. Proces je mnogo stabilniji kada se koncentracije isparljivih masnih kiselina približavaju minimalnoj vrednosti. Ovo se može upotrebiti kao pokazatelj da postoji dovoljna metanogena populacija i da ima dovoljno vremena da se smanji koncentracija vodonika i *VFA*. Stoga je kinetika rasta metanogenih organizama najvažnija veličina u projektivanju anaerobnih procesa. Potrebna vrednost srednjeg vremena zadržavanja ćelija u reaktoru, θ , se određuje na osnovu kinetike i ciljeva procesa prečišćavanja. Na 20, 25 i 35°C, pojava ispiranja biomase u reaktoru kod metanogenih bakterija nastaje pri vrednostima od 7,8; 5,9 i 3,2 dana, respektivno. Sa faktorom sigurnosti 5, projektovana θ vrednost će biti oko 40, 30 i 15 dana, respektivno (faktor sigurnosti iznad 5 se upotrebljava za obezbeđivanje značajno veće stabilnosti procesa).

Efikasnost delovanja anaerobnog procesa, iako zavisna od velikog broja faktora, prvenstveno zavisi od vrste organskih supstanci koja se obrađuju. Najlakše i najefikasnije se razlažu komponente zagađenja koje se nalaze rastvorene u vodi u molekulskom ili jonskom obliku. Znatno sporije se razlažu makromolekulska jedinjenja i koloidni rastvori, a najsporije one supstance koje se nalaze u suspendovanom stanju. Razlog za ovo je što se makromolekuli i suspendovane supstance prethodno moraju prevesti u rastvoren oblik delovanjem ekstracelularnih hidrolitičkih enzima. Brzina kojom se složena makromolekulska jedinjenja mogu prevoditi u rastvoran oblik zavisi od njihove hemijske građe i osobina bakterija anaerobnog vrenja. Pod dejstvom bakterija najlakše se razlažu supstance na koje su bakterije priviknute i imaju potrebne hidrolitičke enzime konstitutivnog karaktera. Kako je sposobnost prilagođavanja bakterija na pojedine supstance ograničena, jasno je da se neke od njih neće uopšte razlagati, ili će se razlagati u malom stepenu.

Dok se u aerobnim postupcima koji su dobro vođeni može postići smanjenje sadržaja organskih supstanci i od 95 %, u standardnom anaerobnom procesu koji funkcioniše pod optimalnim uslovima u toku 30 dana boravka u bioreaktoru može se postići stepen redukcije organskih supstanci koji retko kada iznosi više od 75 %. U novijim varijantama anaerobnih procesa obrade, na primer u dvofaznom procesu, mogu se postići bolji efekti u kraćem vremenu.

4.5.2. Proizvodnja metana

Osnovna karakteristika anaerobnog prečišćavanja otpadnih voda je proizvodnja metana. Količina gasa koja nastaje u anaerobnom procesu obrade zavisi kako od vrste zagađenja tako i od uslova pri kojima se proces izvodi. Za izračunavanje količine gasovitih produkata metanskog vrenja može se koristiti stehiometrijska jednačina:



4.164

Ukoliko se ona primeni na određeni supstrat, na primer na sircetnu kiselinu koja je centralni metabolit metanskog vrenja, može se izračunati teorijski prinos metana po jedinici supstrata. Na osnovu takvog proračuna sledi da se na svaki 1 g BOD može dobiti $\frac{0,267}{1,067} = 0,25 L$

metana pod uslovima procesne temperature (35 – 40°C), odnosno svedeno na normalne uslove 0,35 L.

Jednačina za izračunavanje količine gasa koji se produkuje u toku metanskog vrenja uključuje i nastajanje mikrobne biomase, ima oblik:

$$V_{gas} = 0,35(e \cdot S - 1,42 \cdot P_X) \quad 4.165$$

- V_{gas} količina produkovanog gasa, L
 e koeficijent efikasnosti korišćenja supstrata (0,80–0,95)
 S količina utrošenog supstrata (BOD/d)
 P_X količina produkovane biomase (kg/d)

U praktičnim uslovima funkcionisanja postrojenja za anaerobnu obradu ostvaruje se sledeći prinos gasa (smeša CH_4 , CO_2 i male količine H_2 , H_2S i drugih gasova):

- 500 – 700 L gasa/kg organske supstance unete u reaktor
- 750 – 1100 L gasa/kg razložene organske supstance
- 14 – 37 L gasa/kg po stanovniku na dan

4.5.3. Parametri anaerobnog procesa

Od mnogobrojnih faktora koji utiču na proces anaerobne obrade poseban značaj imaju temperatura, pH , vrsta i koncentracija zagađenja, koncentracija nutrijenata i toksika, vreme boravka u bioreaktoru, mešanje, koncentracija kiseonika, itd.

Kako se bakterije kiselinskog vrenja i metanskog vrenja međusobno značajno razlikuju, optimalno delovanje jedne ili druge grupe bi zahtevalo značajnije razlike u vrednostima pojedinih parametara procesa. Zbog toga, u klasičnim postupcima anaerobne obrade, pod optimalnim uslovima, podrazumevaju se takve vrednosti operativnih parametara, koje omogućavaju što uspešnije zajedničko delovanje obe grupe mikroorganizama ali ne i njihov optimum.

Koncentracija vodonikovih jona, tj. pH , od velikog značaja je za efikasnost funkcionisanja procesa anaerobne obrade. Optimalnu oblast vrednosti pH prvenstveno određuju bakterije metanskog vrenja koje su znatno osetljivije na promenu ovog faktora od bakterija kiselinskog vrenja.

Poznato je da se u drugoj fazi anaerobne obrade organske supstance razlažu delovanjem bakterija kiselinskog vrenja na organske kiseline, pa bi trebalo očekivati opadanje pH vrednosti u sistemu. Međutim, nastale organske kiseline se u trećoj fazi anaerobne obrade prevode u metan delovanjem bakterija metanskog vrenja i uklanjaju iz sistema. Prema tome, biohemijsko delovanje ove dve vrste bakterija je suprotno u odnosu na promene pH . Ukoliko su ta dejstva u neprekidnoj dinamičkoj ravnoteži, pH se neće značajnije menjati i održavaće se u granicama između 6 i 8,5, što je i optimalno.

Ako je pH vrednost znatno niža od 6, brzo dolazi do inaktivacije, a zatim i do odumiranja bakterija metanskog vrenja, što za posledicu ima prekid njihovog delovanja. Prema tome, praćenjem promene pH u bioreaktoru za anaerobnu obradu može se pratiti i efikasnost njegovog funkcionisanja.

Nasuprot fenomenima koji dovode do zakišeljavanja bioreaktora deluje pufeni kapacitet u bioreaktoru. Pufeni kapacitet je posledica prisustva velikog broja kiselih i baznih komponenti koje čine niz konjugovanih kiselobaznih parova. Što je puferna moć veća, veća je i stabilnost funkcije bioreaktora. Kao mera kompenzacione moći anaerobnog bioreaktora uzima se njegov alkalitet. Alkalitet se konvencionalno

izražava preko količine CaCO_3 i što je alkalitet veći, veća je i puferna moć bioreaktora.

Ukupni alkalitet bioreaktora može se izračunati korišćenjem jednačine:

$$\text{Ukupni alkalitet (CaCO}_3) =$$

$$\text{Bikarbonatni alkalitet} + 0,85 \cdot 0,833 \cdot \text{Koncentracija org. kis.} \quad 4.166$$

0,833 konverzioni faktor za usaglašavanje jedinica

0,85 faktor zbog korekcije jer samo 85% organskih kiselina može se odrediti titracijom uz metiloranž

Za izražavanje alkaliteta koristi se i bikarbonatni alkalitet:

$$\text{Bikarbonatni alkalitet} =$$

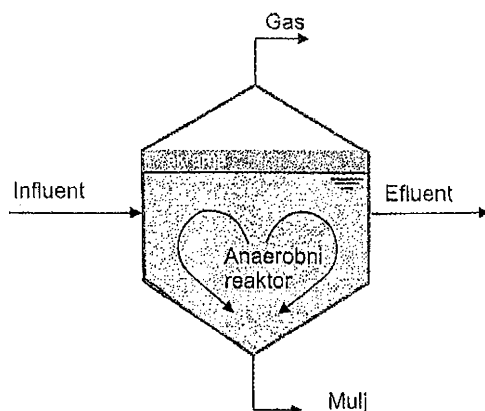
$$\text{Ukupni alkalitet} - 0,8 \cdot \text{Konc. isparljivih kiselina} \quad 4.167$$

4.5.4. Tipovi reaktora za izvođenje anaerobnog procesa

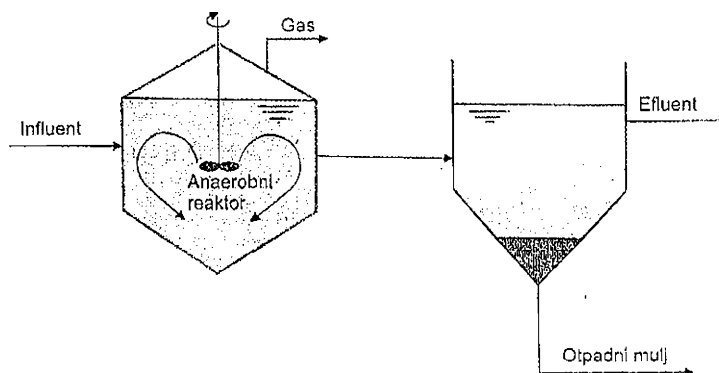
Anaerobni postupci, u zavisnosti od kapaciteta i stepena zagađenja, najčešće se izvode kao konvencionalni ili niskoopterećeni proces, dvostepeni i anaerobni kontakt proces.

Konvencionalni ili niskoopterećeni proces u biološkom reaktoru retko se primenjuje u postrojenjima većih kapaciteta, slika 4.25. Njegova primena je značajna kod postrojenja malog kapaciteta, koja su lokalnog značaja. Ovaj proces podnosi mala opterećenja, a potrebno je dugo vreme boravka.

Za razliku od konvencionalnog, dvostepeni proces uključuje taložnik, čime je omogućeno izvođenje potpunog mešanja u reaktoru, slika 4.26. Efluent se zadržava u taložniku dovoljno da bi se postiglo izdvajanje mulja i istovremeno dovršio proces biološke obrade. U ovom procesu se koristi visoko opterećeni bioreaktor sa potpunim mešanjem.

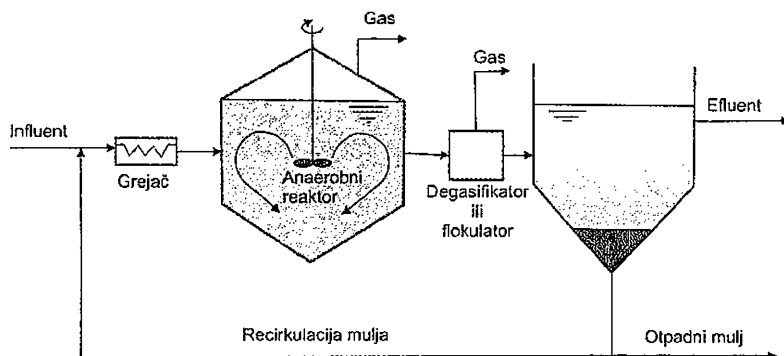


Slika 4.25. Anaerobni konvencionalni proces



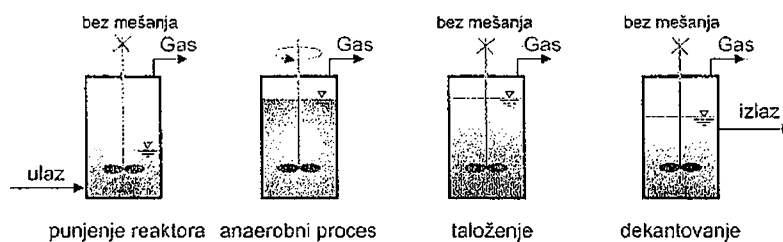
Slika 4.26. Anaerobni dvostepeni proces

Anaerobni kontakt proces je prvenstveno namenjen obradi visokozagađenih industrijskih voda, ali se koristi i u obradi bioloških i drugih muljeva, slika 4.27. Karakteristika ovog procesa je recirkulacija mikroorganizama anaerobnog vrenja koji su izdvojeni taloženjem u taložniku. Recirkulisani mulj koji nosi mikroorganizme meša se sa influentom pre ulaska u digester, pri čemu nastaju biosorpcija i koagulacija (karakteristične za aerobnu stabilizaciju). Kako bi se efluent što bolje izbistrio, između digestora i taložnika postavlja se degasifikator u kome se izdvaja gas preostao u efluentu koji izlazi iz digestora. U anaerobnoj kontakt stabilizaciji postižu se bolji efekti biorazgradnje od onih koji se mogu postići u visoko opterećenim digesterima.



Slika 4.27. Anaerobni kontakt proces

U novije vreme se primenjuju i anaerobni sekvencionalni šaržni reaktori posebno za specifične industrijske otpadne vode, slika 4.28.



Slika 4.28. Anaerobni sekvencionalni šaržni proces

Kod anaerobnog procesa glavnu ulogu imaju odgovarajući mikroorganizmi, pa se proračuni ovog dela sistema svode na obezbeđivanje adekvatnih uslova sredine pod kojima anaerobni mikroorganizmi uklanjaju zagađujuće materije. Pored toga, kod ovog procesa izdvaja se i metan kao gas, pa je potrebno izračunati koje su to proizvedene količine gasa i količine raspoložive energije.

5. DEZINFEKCIJA

Dezinfekcija je postupak inaktivacije živih organizama u prečišćenoj otpadnoj vodi, koji izazivaju razne bolesti i infekcije. Uvek se izvodi kao poslednji proces, pre ispuštanja prečišćene otpadne vode u neki prirodni recipijent.

Dezinfekcija se može vršiti dodatkom određenih hemijskih sredstava, kao najrasprostranjenijim metodama, dok se razvojem novih i ekonomski isplativih tehnika, sve više primenjuje i dezinfekcija otpadne vode UV zracima.

Bez obzira o kom postupku dezinfekcije se radi, u svojoj osnovi, ovim procesom se mora svesti broj živih mikroorganizama prisutnih u vodi na zakonom predviđeni nivo.

Smanjenje broja mikroorganizama podleže jednačini:

$$-\frac{dN}{dt} = k \cdot N \quad 5.1$$

N broj detektovanih mikroorganizama
 t vreme potrebno da se smanji broj mikroorganizama, h
 k konstanta brzine inaktivacije mikroorganizama, h^{-1}

Integraljenjem prethodne jednačine u granicama broja mikroorganizama prisutnih u vodi od N_0 do N_t , kojima odgovara vremenski interval dezinfekcije od 0 do t , dobija se odnos:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-k \cdot t} \quad 5.2$$

Odnosno:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -k \cdot t \quad 5.3$$

Crtanjem zavisnosti $\ln \frac{N_t}{N_0}$ od vremena dezinfekcije, t , iz nagiba se može odrediti vrednost k .

Konstanta brzine inaktivacije se menja sa temperaturom po Arenijusovoj jednačini:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad 5.4$$

- A konstanta karakteristična za mikroorganizam, $vreme^{-1}$
- E_a energija aktivacije karakteristična za mikroorganizam, kJ/mol
- R gasna konstanta $kJ/mol \cdot K$
- T temperatura, K

Rešavanjem prethodne jednačine po vremenu, dobija se:

$$t = \frac{-\ln \frac{N_t}{N_0}}{k} \quad 5.5$$

- N_0 početni broj mikroorganizama
- N_t broj prisutnih mikroorganizama nakon vremena t
- t vreme dezinfekcije, min

Tokom procesa dezinfekcije, veoma važan parametar je koncentracija dezinfekcionog sredstva, koja utiče na konstantu brzine inaktivacije, što se može predstaviti jednačinom:

$$k = k' C^n \quad 5.6$$

- k' konstanta odumiranja mikroorganizama
- C koncentracija dezinficijensa, mg/L
- n koeficijent razblaženja

Sada se zamenom u jednačinu 5.3 može dobiti:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-k' C^n \cdot t} \quad 5.7$$

odnosno:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -k' C^n \cdot t \quad 5.8$$

Linearizovani oblik jednačine 5.8, daje vezu između koncentracije dezinfekcionog sredstva i vremena potrebnog za dezinfekciju:

$$\ln C = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{k'} \left(-\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right] \quad 5.9$$

Crtanjem funkcije C od t u $\log - \log$ dijagramu, može se iz nagiba dobiti vrednost koeficijenta razblaženja, n , koje se razmatra za tri oblasti:

$n = 1$ za dezinfekciju su podjednako važni i vreme i koncentracija dezinficijensa

$n > 1$ koncentracija dezinficijensa je važnija nego vreme

$n < 1$ vreme je važnije za dezinfekciju, nego koncentracija dezinficijensa

U realnim uslovima, eksperimentalno je potvrđeno da brzina inaktivacije mikroorganizama nije konstantna i da opada sa vremenom, pa je ranije definisanu jednačinu za brzinu 5.1 potrebno modifikovati:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{k \cdot N}{1 + a(Ct)} \quad 5.10$$

odnosno nakon integraljenja:

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{[1 + a(C \cdot t)]^{k/n}} \quad 5.11$$

C koncentracija dezinfekcionog sredstva koja zaostaje u vodi nakon vremena t , mg/L

a koeficijent brzine

U uslovima kada se dezinfekcija radi sa hlornim jedinjenjima, zadržava se rezidualna koncentracija hlora, C_R , pa se jednačina 5.11 može pisati u obliku:

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{[1 + 0,23(C_R \cdot t)]^3} \quad 5.12$$

Ovako definisana vrednost brzine dezinfekcije mikroorganizama ima sledeće vrednosti:

$$\frac{N_t}{N_0} = 1 \quad \text{za } C_R \cdot t < b \quad 5.13$$

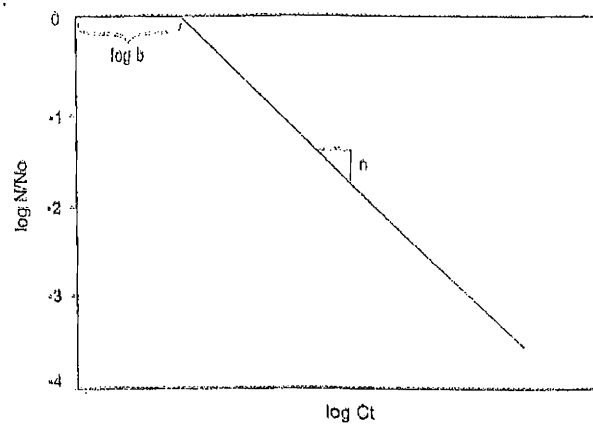
$$\frac{N_t}{N_0} = \left[\frac{(C_R \cdot t)}{b} \right]^{-n} \quad C_R \cdot t > b \quad 5.14$$

Pri čemu konstanta b reprezentuje onu vrednost proizvoda $C_R \cdot t$ koja se potroši na *lag* fazu inaktivacije, tj. pri kojoj još uvek nema dezinfekcije,

tj. za vrednost $\frac{N_t}{N_0} = 1$, odnosno pri kojoj prava zavisnosti na dijagramu

$-\log \frac{N_t}{N_0} = f(\log(C_R \cdot t))$, preseca x -osu, pri vrednosti $\log \frac{N_t}{N_0} = 0$,

slika 5.1.



Slika 5.1. Zavisnost nivoa dezinfekcije od proizvoda koncentracije i vremena

Tipične vrednosti za n i b za koliformne i fekalne koliformne mikroorganizme su 2,8 i 4, odnosno 2,8 i 3.

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{[1 + 0,23(C_R \cdot t)]^3} \quad 5.12$$

Ovako definisana vrednost brzine dezinfekcije mikroorganizama ima sledeće vrednosti:

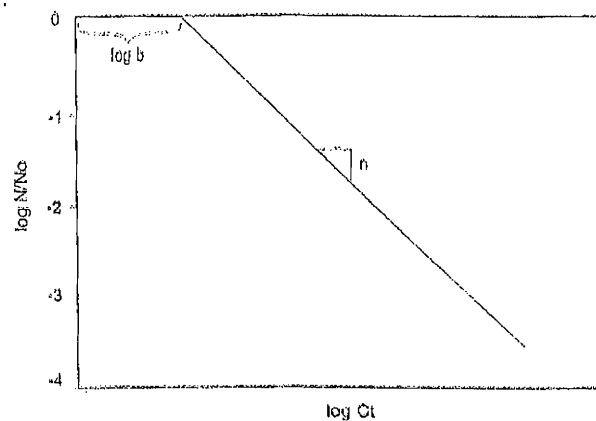
$$\frac{N_t}{N_0} = 1 \quad \text{za } C_R \cdot t < b \quad 5.13$$

$$\frac{N_t}{N_0} = \left[\frac{(C_R \cdot t)}{b} \right]^{-n} \quad C_R \cdot t > b \quad 5.14$$

Pri čemu konstanta b reprezentuje onu vrednost proizvoda $C_R \cdot t$ koja se potroši na lag fazu inaktivacije, tj. pri kojoj još uvek nema dezinfekcije, tj. za vrednost $\frac{N_t}{N_0} = 1$, odnosno pri kojoj prava zavisnosti na dijagramu

$-\log \frac{N_t}{N_0} = f(\log(C_R \cdot t))$, preseca x -osu, pri vrednosti $\log \frac{N_t}{N_0} = 0$,

slika 5.1.



Slika 5.1. Zavisnost nivoa dezinfekcije od proizvoda koncentracije i vremena

Tipične vrednosti za n i b za koliformne i fekalne koliformne mikroorganizme su 2,8 i 4, odnosno 2,8 i 3.

6. ZADACI SA REŠENJIMA

Merenje protoka

Zadatak 1. Cev prečnika 1,0 m i hrapavosti površine $n = 0,013$, nalazi se pod nagibom od 0,0025. Visina vode u cevi iznosi 0,3 m. Koliki je protok vode kroz tu cev?

Rešenje:

Na osnovu vrednosti prečnika cevi i visine vode u cevi, vidi se da voda ispunjava cev ispod polovine, pa se za ovaj slučaj, za proračun, koriste jednačine zasnovane na izračunavanju kružnog odsečka.

Potrebne vrednosti za izračunavanje protoka vode kroz cev su:

$$r = \frac{D}{2} = 0,5m$$

$$d = r - H = 0,5 - 0,3 = 0,2m$$

$$\theta = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{d}{r}} = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{0,2}{0,5}} = 2 \text{ rad}$$

Izračunavanje okvašenog obima:

$$O = r \cdot \theta = 0,5 \cdot 2 = 1m$$

Površina poprečnog preseka dela cevi koja je ispunjena vodom se izračunava primenom sledeće jednačine:

$$A = \frac{r^2}{\cos \frac{r-H}{r}} - (r-H) \cdot \sqrt{2rH - H^2}$$

Zamenom vrednosti dobija se:

$$A = \frac{0,5^2}{\cos \frac{0,5-0,3}{0,5}} - (0,5 - 0,3) \cdot \sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 0,3 - 0,3^2}$$

$$A = 0,158m^2$$

Hidraulički radijus, R , predstavlja odnos površine poprečnog preseka dela cevi koja je ispunjena vodom i okvašenog obima, a njegova vrednost u ovom slučaju iznosi:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{0,158}{1} = 0,158m$$

Protok otpadne vode kroz cev se dobija množenjem poprečnog preseka A i brzine proticanja otpadne vode V . Za izračunavanje brzine proticanja otpadne vode kroz cev u kojoj vlada atmosferski pritisak i kroz koju se voda transportuje pomoću gravitacione energije, koristi se Manningova jednačina:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Vrednost traženog protoka je jednaka:

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 0,158 \cdot \frac{1}{0,013} \cdot (0,158)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,0025)^{\frac{1}{2}} = 0,178 \frac{m^3}{s}$$

Zadatak 2. Prečnik kanalizacione cevi je $1,2 m$, a visina vode u cevi iznosi $0,35 m$. Nagib cevi je $0,0025$, a hrapavost $0,012 s/m^{1/3}$.

Odrediti:

- 1) Protok vode kroz cev.
- 2) Ukoliko bi ista količina vode proticala punim poprečnim presekom kroz cev, koji bi tada prečnik cevi bio potreban?

Rešenje:

- 1) Protok vode kroz cev se izračunava kao i u prethodnom zadatku:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1,2}{2} = 0,6 m$$

$$d = r - H = 0,6 - 0,35 = 0,25 m$$

$$\theta = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{d}{r}} = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{0,25}{0,6}} = 2 \text{ rad}$$

$$O = r \cdot \theta = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ m}$$

$$A = \frac{r^2}{\cos \frac{r-H}{r}} - (r-H) \cdot \sqrt{2rH - H^2}$$

$$A = \frac{0,6^2}{\cos \frac{0,6-0,35}{0,6}} - (0,6 - 0,35) \cdot \sqrt{2 \cdot 0,6 \cdot 0,35 - 0,35^2}$$

$$= 0,224 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{O} = \frac{0,224}{1,2} = 0,186 \text{ m}$$

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q = 0,224 \cdot \frac{1}{0,012} \cdot 0,186^{2/3} \cdot 0,0025^{1/2}$$

$$Q = 0,304 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

2) Ukoliko voda protiče po punom poprečnom preseku, površina poprečnog preseka je površina kruga a okvašeni obim je obim kruga, pa je hidraulički radijus tada jednak:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4}}{D \pi} = \frac{D}{4}$$

a traženi prečnik cevi se dobija kombinovanjem sledeće jednačine:

$$Q = A \cdot V = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$0,304 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,012} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot 0,0025^{1/2}$$

$$D^{8/3} = 0,234$$

$$D = \sqrt[6]{0,234^3} = 0,58 \text{ m}$$

Zadatak 3. Kroz kanalizacionu cev prečnika 0,3 m, protiče $0,057 \text{ m}^3/\text{s}$ otpadne vode. Cev je pod nagibom od 0,0036 a njen koeficijent hrapavosti iznosi 0,012. Odrediti visinu vode u cevi kao i brzinu proticanja vode kroz cev.

Rešenje:

Kada nije poznata visina vode u cevi, krenuće se od pretpostavke da voda ispunjava ovu cev po punom poprečnom preseku, pa se dobija da je u tom slučaju protok kroz cev jednak:

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_f = D^2 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,012} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,0036)^{\frac{1}{2}}$$

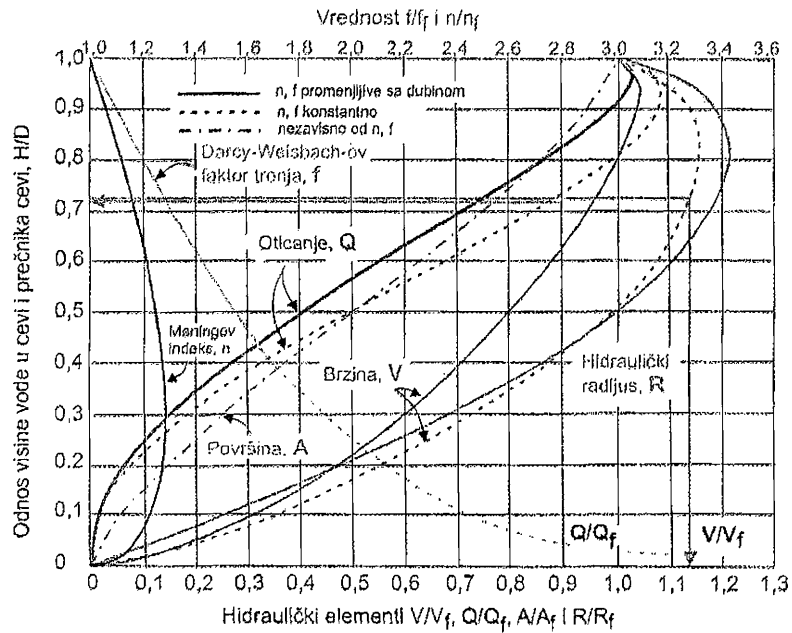
$$Q_f = 0,3^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,012} \cdot \left(\frac{0,3}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,0036)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_f = 0,0629 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Zadatkom je data stvarna vrednost protoka kroz posmatranu cev, pa se deljenjem stvarnog protoka i protoka vode, ukoliko bi ona ispunjavala celu cev, dobija vrednost:

$$\frac{Q}{Q_f} = \frac{0,057}{0,0629} = 0,906$$

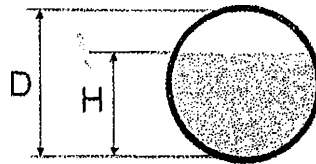
Od ove vrednosti na apcisi se na dijagramu vuče vertikalna linija do odgovarajuće krive za protok (isprekidane, jer se uzima da je n , hrapavost, konstantna), odakle se povlačenjem horizontalne linije do ordinate očitava vrednost H/D :



$$\frac{H}{D} = 0,72$$

Iz ovog odnosa se dobija i visina vode u cevi:

$$H = 0,72 \cdot D = 0,72 \cdot 0,3 = 0,216 \text{ m}$$



Poređenjem vrednosti prečnika cevi i visine vode vidi se da u ovom slučaju voda ispunjava više od polovine poprečnog preseka cevi.

Brzina proticanja vode kroz cev se dobija istim principom. Prvo se izračunava brzina vode ukoliko bi voda proticala punim poprečnim presekom,

$$V_f = \frac{Q_f}{A} = \frac{0,0629}{0,0707} = 0,89 \frac{m}{s}$$

pa se obrnuto od prethodnog slučaja, od prethodno dobijene vrednosti H/D na ordinati povlači horizontalna linija do odgovarajuće krive za brzinu (isto isprekidane linije jer je n konstantno), a iz te tačke se potom povlači vertikalna linija do apcise i očitava vrednost:

$$\frac{V}{V_f} = 1,13$$

Stvarna brzina kroz cev iznosi:

$$V = 1,13 \cdot 0,89 = 1,0 \frac{m}{s}$$

Zadatak 4. Kroz kanalizacionu cev prečnika $0,4 \text{ m}$ protiče $360 \text{ m}^3/\text{h}$ otpadne vode. Cev se nalazi pod nagibom od $0,004$, a hrapavost cevi iznosi $0,013 \text{ s/m}^{1/3}$. Odrediti visinu vode u cevi.

Rešenje:

Ovaj zadatak se rešava na isti način kao i prehodni.

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q_f = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q_f = \frac{0,4^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{0,4}{4}\right)^{2/3} \cdot 0,004^{1/2}$$

$$Q_f = 0,132 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = 360 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\frac{Q}{Q_f} = \frac{0,1}{0,132} = 0,758 \rightarrow \text{dijagram}$$

$$\frac{H}{D} = 0,64$$

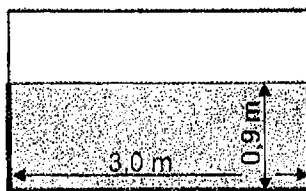
$$H = 0,64 \cdot 0,4 = 0,256 \text{ m}$$

Zadatak 5. Kroz pravougaoni kanal širine 3 m i uniformne dubine od 0,9 m protiče otpadna voda. Hrapavost kanala je 0,016 s/m^{1/3} a nagib kanala je 0,00016. Odrediti:

- 1) Protok otpadne vode kroz kanal.
- 2) Prečnik cevi koja transportuje vodu iz kanala dalje na tretman. Pretpostaviti da voda kroz cev hrapavosti 0,013 s/m^{1/3} protiče punim poprečnim presekom.

Rešenje:

1)



Izračunava se površina poprečnog preseka kanala,

$$A = HW = 0,9 \cdot 3 = 2,7 \text{ m}^2$$

i okvašenog obima,

$$O = 2H + W = 2 \cdot 0,9 + 3 = 4,8 \text{ m}$$

odakle se dobija da je hidraulički radijus:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{2,7}{4,8} = 0,56 \text{ m}$$

Izračunavanje protoka kroz kanal kroz koji se voda transportuje gravitacionom energijom, svodi se na primenu Maningove jednačine:

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,016} \cdot 0,56^{\frac{2}{3}} \cdot 0,00016^{\frac{1}{2}} = 0,55 \text{ m/s}$$

$$Q = 2,7 \cdot 0,55 = 1,48 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- 2) Pretpostaviće se da cev ima isti nagib kao i kanal, a pošto se voda kroz cev transportuje isto gravitacionom energijom za proračun se može koristiti Maningova jednačina, pa je prečnik cevi jednak:

$$Q = A \cdot V = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$1,48 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot (0,00016)^{1/2}$$

$$D^{8/3} = 4,88$$

$$D = \sqrt[3]{4,88^3}$$

$$D = 1,8 \text{ m}$$

Zadatak 6. Po punom poprečnom preseku, kroz kanalizacionu cev se otpadna voda transportuje pomoću gravitacione energije u pravougaoni otvoren kanal. Brzina proticanja vode kroz cev iznosi $0,8 \text{ m/s}$. Prečnik cevi je $1,1 \text{ m}$. Pravougaoni kanal je pod nagibom od $0,0021$, a njegova hrapavost iznosi $0,016 \text{ s/m}^{1/3}$. Odrediti dimenzije pravougaonog kanala ako se uzme da je odnos dubine prema širini $1:2$.

Rešenje:

Voda protiče punim poprečnim presekom cevi pa je površina poprečnog preseka:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{1,1^2 \pi}{4} = 0,95 \text{ m}^2$$

Vrednost brzine proticanja vode kroz cev je data zadatkom, pa se množenjem sa vrednošću za A dobija protok vode kroz cev:

$$Q = A \cdot V = 0,95 \cdot 0,8 = 0,76 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Na osnovu odnosa dubine prema širini 1:2 dobija se da je površina pravougaonog kanala jednaka:

$$A_k = H \cdot W = H \cdot 2H = 2H^2$$

Odnos površine kanala i okvašenog obima kanala, daje vrednost hidrauličkog radijusa:

$$R = \frac{H \cdot W}{2H + W} = \frac{H \cdot 2H}{2H + 2H} = \frac{H}{2}$$

Zamenom A_k i R u jednačinu za izračunavanje protoka dobija se visina kanala odnosno širina:

$$Q = A_k \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$0,76 = 2H^2 \cdot \frac{1}{0,016} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{2/3} \cdot 0,0021^{1/2}$$

$$H^{8/3} = 0,211$$

$$H = \sqrt[3]{0,211^3}$$

$$H = 0,56 \text{ m}$$

$$W = 2 \cdot 0,56 = 1,12 \text{ m}$$

Zadatak 7. Otpadna voda se pomoću kanalizacione cevi, prečnika 0,8 m transportuje u pravougaoni, otvoren kanal. Hrapavost cevi iznosi $0,013 \text{ s/m}^{1/3}$, a visina vode u cevi čini 37,5 % prečnika cevi. Kanal i cev se nalaze pod istim nagibom od 0,15%. Hrapavost kanala je $0,018 \text{ s/m}^{1/3}$. Odnos širine i visine kanala je 2:1. Odrediti površinu poprečnog preseka pravougaonog kanala.

Rešenje:

$$r = \frac{D}{2} = 0,4 \text{ m}$$

$$d = r - H = 0,4 - 0,3 = 0,1 \text{ m}$$

$$\theta = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{d}{r}} = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{0,1}{0,4}} = 2 \text{ rad}$$

$$O = r \cdot \theta = 0,4 \cdot 2 = 0,8 \text{ m}$$

$$A = \frac{r^2}{\cos \frac{r-H}{r}} - (r-H) \cdot \sqrt{2rH - H^2}$$

$$A = \frac{0,4^2}{\cos \frac{0,4-0,3}{0,4}} - (0,4-0,3) \cdot \sqrt{2 \cdot 0,4 \cdot 0,3 - 0,3^2}$$

$$A = 0,12 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{O} = \frac{0,12}{0,8} = 0,15 \text{ m}$$

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 0,12 \cdot \frac{1}{0,013} \cdot (0,15)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,0015)^{\frac{1}{2}} = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A_k = H \cdot W = H \cdot 2H = 2H^2$$

$$R = \frac{H \cdot W}{2H + W} = \frac{H \cdot 2H}{2H + 2H} = \frac{H}{2}$$

$$0,1 = 2H^2 \cdot \frac{1}{0,018} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,0015^{1/2}$$

$$H^{8/3} = 0,037$$

$$H = \sqrt[8]{0,037^3}$$

$$H = 0,29 \text{ m}$$

$$W = 2 \cdot 0,29 = 0,58 \text{ m}$$

$$A = 0,29 \cdot 0,58 = 0,17 \text{ m}^2$$

Zadatak 8. Kroz dve kanalizacione cevi transportuje se voda do sabirnog kanala. Cevi se nalaze pod nagibom od 0,5 % a njihova hrapavost iznosi $0,013 \text{ s/m}^{1/3}$. Prečnik prve kanalizacione cevi je $0,6 \text{ m}$, a protok otpadne vode kroz ovu cev je $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$. Visina vode kroz prvu cev je zapravo vrednost prečnika druge cevi kroz koju otpadna voda protiče punim poprečnim presekom. Odrediti ukupnu količinu vode koja dolazi kroz ove dve cevi u sabirni kanal u toku jednog dana.

Rešenje:

$$Q_f = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q_f = \frac{0,6^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{0,6}{4}\right)^{2/3} \cdot 0,005^{1/2}$$

$$Q_f = 0,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\frac{Q_1}{Q_f} = \frac{0,35}{0,43} = 0,81 \rightarrow \text{dijagram}$$

$$\frac{H}{D} = 0,68$$

$$H = 0,68 \cdot 0,6 = 0,41 \text{ m}$$

Zadatkom je rečeno, da je vrednost visine vode kroz prvu cev zapravo vrednost prečnika druge cevi, pa sledi:

$$D_2 = H = 0,41 \text{ m}$$

$$Q_2 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q_2 = \frac{0,41^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{0,41}{4}\right)^{2/3} \cdot 0,005^{1/2}$$

$$Q_2 = 0,157 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ukupna količina vode koja dolazi kroz obe cevi u sabirni kanal u toku jednog dana je jednaka:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 0,35 + 0,157 = 0,507 \frac{m^3}{s}$$

$$V = Q \cdot t = 0,507 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{60s}{h} \cdot \frac{24h}{d}$$

$$V = 730 \frac{m^3}{d}$$

Zadatak 9. Kroz pravougaoni otvoren kanal otpadna voda protiče sa protokom od $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Širina kanala iznosi $2,5 \text{ m}$, a površina poprečnog preseka vode u njemu je 2 m^2 . Koeficijent hrapavosti kanala je $0,016 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$. Otpadna voda se iz kanala transportuje nizvodno cevima različitog prečnika, hrapavosti $0,013 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$. Odrediti:

- 1) Nagib pravougaonog kanala.
- 2) Protok vode kroz prvu cev, ako voda kroz nju ne protiče punim poprečnim presekom, pri čemu je prečnik cevi $0,9 \text{ m}$, a visina vode u cevi je $0,35 \text{ m}$.
- 3) Prečnik druge cevi kroz koju voda protiče punim poprečnim presekom.

Rešenje:

- 1) Izračunavanje potrebnih vrednosti, A , O , R :

$$A = H \cdot W$$

$$H = \frac{A}{W} = \frac{2}{2,5} = 0,8 \text{ m}$$

$$O = 2H + W = 2 \cdot 0,8 + 2,5 = 4,1 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{O} = \frac{2}{4,1} = 0,489 \text{ m}$$

Iz jednačine za izračunavanje protoka, dobija se vrednost nagiba kanala:

$$Q = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$S = \left(\frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{1 \cdot 0,016}{2 \cdot 0,489^{2/3}} \right)^2 = 1,66 \cdot 10^{-4}$$

2) Na osnovu datih vrednosti za prečnik cevi i visinu vode u cevi, vidi se da je u pitanju slučaj kada voda ispunjava manje od polovine cevi, pa se za proračun koriste ranije pomenute jednačine:

$$\theta = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{d}{r}} = 2 \cdot \frac{1}{\cos \frac{0,1}{0,45}} = 2 \text{ rad}$$

$$O = \theta r = 2 \cdot 0,45 = 0,9 \text{ m}$$

$$A = \frac{r^2}{\cos \frac{r-H}{r}} - (r-H) \sqrt{2rH - H^2}$$

$$A = \frac{0,45^2}{\cos \frac{0,45-0,35}{0,45}} - (0,45 - 0,35) \sqrt{2 \cdot 0,45 \cdot 0,35 - 0,35^2}$$

$$A = 0,159 \text{ m}^2$$

$$R_h = \frac{A}{O} = \frac{0,159}{0,9} = 0,176 \text{ m}$$

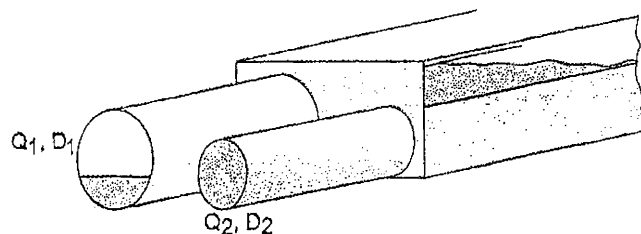
Pretpostavlja se da se cevi nalaze pod istim nagibom kao i kanal, pa je protok kroz prvu cev jednak:

$$Q_1 = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$$Q_1 = 0,159 \cdot \frac{1}{0,013} \cdot (0,176)^{2/3} \cdot (1,66 \cdot 10^{-4})^{1/2}$$

$$Q_1 = 0,049 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- 3) Prvo e potrebno da se odredi protok vode kroz drugu cev. Ukupan protok kroz cevi je jednak protoku kroz kanal, Q .



$$Q = Q_1 + Q_2$$

Protok kroz drugu cev se dobija oduzimanjem protoka kroz prvu cev od ukupnog protoka kroz kanal:

$$Q_2 = Q - Q_1 = 1 - 0,049 = 0,951 \text{ m}^3/\text{s}$$

Zamenom vrednosti u jednačinu,

$$Q_2 = A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

odnosno,

$$Q_2 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

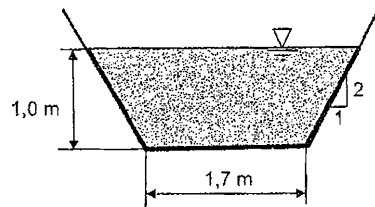
dobija se tražena vrednost prečnika:

$$0,951 = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (1,66 \cdot 10^{-4})^{\frac{1}{2}}$$

$$D^{\frac{8}{3}} = 3,0787$$

$$D = D_2 = 1,52 \text{ m}$$

Zadatak 8. Kameni trapezoidni kanal ima dno širine 1,7 m, dubinu vode 1,0 m, odnos bočnih stranica 2:1 i koeficijent hrapavosti $n=0,040 \text{ s}/\text{m}^{\frac{1}{3}}$. Dno kanala je pod nagibom od 0,16%. Odrediti protok vode kroz ovaj kanal.

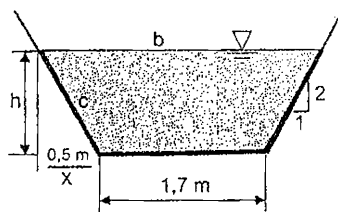


Rešenje:

Odnos bočnih stranica je 2:1, što znači da je dužina x na slici dva puta manja od visine vode u kanalu, pa se iz proporcije dobija:

$$2:1 = 1,0:x$$

$$x = 0,5m$$



Izračunavanjem vrednosti x omogućeno je izračunavanje dužine stranice c , primenom Pitagorine teoreme:

$$c = \sqrt{h^2 + x^2} = 1,12m$$

Površina trapeza je jednaka,

$$A = \frac{1}{2} \cdot (a + b) \cdot h$$

$$a = 1,7m$$

$$b = a + 2 \cdot 0,25 = 1,7 + 2 \cdot 0,5 = 2,7m$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot (1,7 + 2,7) \cdot 1,0$$

$$A = 2,2m^2$$

a okvašeni obim je u ovom slučaju:

$$O = 2c + a = 2 \cdot 1,12 + 1,7 = 2,94m$$

Izračunavanjem hidrauličkog radijusa, dobija se i tražena vrednost protoka vode kroz trapezoidni kanal:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{2,2}{3,94} = 0,56m$$

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot V = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = 2,2 \cdot \frac{1}{0,040} \cdot (0,56)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,0016)^{\frac{1}{2}} \\ &= 1,5 \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

Egalizacija

Zadatak 1. Odrediti potrebnu zapreminu egalizacionog bazena i efekat egalizacije na *BOD* opterećenje. Ulazni podaci:

<i>t, h</i>	<i>Q_{ul}, m³/s</i>	<i>BOD_{ul}, mg/L</i>
24	0,275	150
1	0,220	115
2	0,165	75
3	0,130	50
4	0,105	45
5	0,100	60
6	0,120	90
7	0,205	130
8	0,355	175
9	0,410	200
10	0,425	215
11	0,430	220
12	0,425	220
13	0,405	210
14	0,385	200
15	0,350	190
16	0,325	180
17	0,325	170
18	0,330	175
19	0,365	210
20	0,400	280
21	0,400	305
22	0,380	245
23	0,345	180

Rešenje:

Prvi korak u određivanju potrebne zapremine egalizacionog bazena je određivanje zapremine otpadne vode koja dolazi u toku odgovarajućeg časa u ispitivanom periodu.

$$V = Q \cdot t$$

t, h	$Q_{ul}, m^3/s$	V_{ul}, m^3
24	0,275	990
1	0,220	792
2	0,165	594
3	0,130	468
4	0,105	378
5	0,100	360
6	0,120	432
7	0,205	738
8	0,355	1278
9	0,410	1476
10	0,425	1530
11	0,430	1548
12	0,425	1530
13	0,405	1458
14	0,385	1386
15	0,350	1260
16	0,325	1170
17	0,325	1170
18	0,330	1188
19	0,365	1314
20	0,400	1440
21	0,400	1440
22	0,380	1368
23	0,345	1242

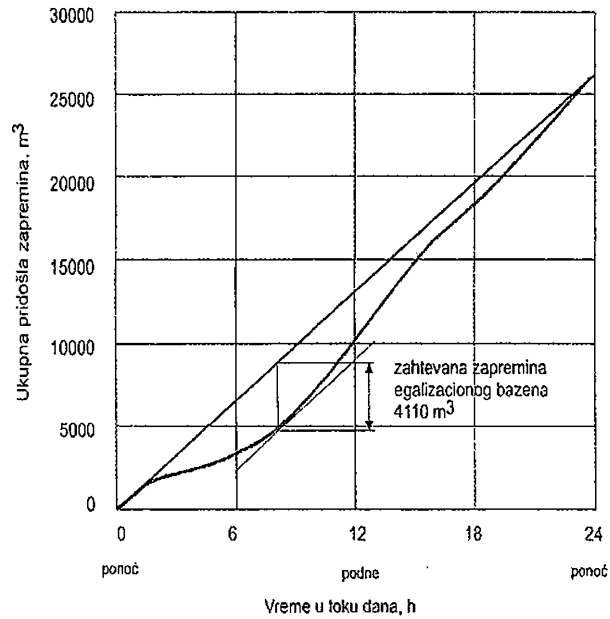
Sledeći korak je izračunavanje kumulativne zapremine otpadne vode koja pristigne na postrojenje u toku 24 časa. Način na koji se računa kumulativna zapremina, najbolje opisuju strelice u sledećoj tabeli, gde se prethodna količina akumulirane vode u bazenu sabira sa novopridošlom zapreminom vode u datom vremenu:

V, m^3	Kumulativna zapremina, m^3
990	990
792	1782
594	2376
468	2844
378	3222
360	3582
432	4014
738	4752
1278	6030
1476	7506
1530	9036
1548	10584
1530	12114
1458	13572
1386	14985
1260	16218
1170	17388
1170	18558
1188	19746
1314	21060
1440	22500
1440	23940
1368	25308
1242	26550

Poslednja vrednost u koloni za kumulativnu zapreminu pokazuje da u toku 24 časa pristigne $26550 m^3$ otpadne vode na tretman.

Nakon dobijenih vrednosti pristupa se grafičkom određivanju potrebene zapremine egalizacionog bazena, tako što se na

ordinatu stavljaju vrednosti iz kolone za kumulativnu zapreminu, a na apcisu vreme.



Prava linija na dijagramu pokazuje konstantan protok otpadne vode, koji se šalje iz egalizacionog bazena na tretman,

$$Q_{sr} = Q_{iz} = \frac{\sum Q}{24} = 0,307 \text{ m}^3/\text{s}$$

dok crvena linija na dijagramu pokazuje količinu vode koja u toku određenog časa pristiže na postrojenje. Iz tačke koja pokazuje minimum na krivoj povlači se tangenta, potom se iz te tačke povlači vertikalna linija do prave linije i očitava razlika.

Ova razlika predstavlja najveću količinu vode koja ostaje u određenom vremenu u bazenu pa je ujedno ovo i potrebna zapremina egalizacionog bazena:

$$V = 4110 \text{ m}^3$$

Nakon određivanja zapremine egalizacionog bazena potrebno je analizirati šta se prilikom ujednačavanja protoka dešava sa

količinom zagađenja koja se tom prilikom šalje postrojenju na uklanjanje.

$t,$ h	$Q_{ul},$ m^3/s	$V_{ul},$ m^3	$BOD_{ul},$ mg/L	$Q_{iz},$ m^3/s	$V_{iz},$ m^3
24	0,275	990	150	0,307	1106
1	0,220	792	115	0,307	1106
2	0,165	594	75	0,307	1106
3	0,130	468	50	0,307	1106
4	0,105	378	45	0,307	1106
5	0,100	360	60	0,307	1106
6	0,120	432	90	0,307	1106
7	0,205	738	130	0,307	1106
8	0,355	1278	175	0,307	1106
9	0,410	1476	200	0,307	1106
10	0,425	1530	215	0,307	1106
11	0,430	1548	220	0,307	1106
12	0,425	1530	220	0,307	1106
13	0,405	1458	210	0,307	1106
14	0,385	1386	200	0,307	1106
15	0,350	1260	190	0,307	1106
16	0,325	1170	180	0,307	1106
17	0,325	1170	170	0,307	1106
18	0,330	1188	175	0,307	1106
19	0,365	1314	210	0,307	1106
20	0,400	1440	280	0,307	1106
21	0,400	1440	305	0,307	1106
22	0,380	1368	245	0,307	1106
23	0,345	1242	180	0,307	1106

Konstantna vrednost protoka otpadne vode koja se šalje na tretman je jednaka $0,307 m^3/s$, odnosno ukupna zapremina od $1106 m^3$ u toku jednog sata. Potrebno je uočiti koja prva

vrednost protoka u tabeli premašuje ovu vrednost, gledano od ponoći (jer se tada i počelo sa merenjem).

Iz tabele se vidi da prva vrednost koja premašuje srednji protok je u 8 časova, pa je potrebno presložiti podatke u tabeli počevši od 8 h.

t, h	$Q_{ul}, m^3/s$	V_{ul}, m^3	$BOD_{ul}, mg/L$
8	0,355	1278	175
9	0,410	1476	200
10	0,425	1530	215
11	0,430	1548	220
12	0,425	1530	220
13	0,405	1458	210
14	0,385	1386	200
15	0,350	1260	190
16	0,325	1170	180
17	0,325	1170	170
18	0,330	1188	175
19	0,365	1314	210
20	0,400	1440	280
21	0,400	1440	305
22	0,380	1368	245
23	0,345	1242	180
24	0,275	990	150
1	0,220	792	115
2	0,165	594	75
3	0,130	468	50
4	0,105	378	45
5	0,100	360	60
6	0,120	432	90
7	0,205	738	130

Sledeći korak je određivanje zapremine vode koja se skladišti tokom odgovarajućeg intervala od jednog časa, V_{sc} u egalizacionom bazenu. Ova zapremina se računa tako što se na zapreminu koja je zaostala u egalizacionom bazenu od prethodnog časa (prisutna zapremina, V_p) doda zapremina

otpadne vode koja pristiže u posmatranom satu i oduzme konstantna zapremina vode koja napušta egalizacioni bazen:

$$V_{sc} = V_p + V_{ul} - V_{iz}$$

t, h	$Q_{ul}, m^3/s$	V_{ul}, m^3	$BOD_{ul}, mg/L$	V_{sc}, m^3
8	0,355	1278	175	172
9	0,410	1476	200	542
10	0,425	1530	215	966
11	0,430	1548	220	1408
12	0,425	1530	220	1832
13	0,405	1458	210	2184
14	0,385	1386	200	2464
15	0,350	1260	190	2618
16	0,325	1170	180	2680
17	0,325	1170	170	2746
18	0,330	1188	175	2828
19	0,365	1314	210	3036
20	0,400	1440	280	3370
21	0,400	1440	305	3704
22	0,380	1368	245	3966
23	0,345	1242	180	4102
24	0,275	990	150	3986
1	0,220	792	115	3972
2	0,165	594	75	3160
3	0,130	468	50	2522
4	0,105	378	45	1794
5	0,100	360	60	1048
6	0,120	432	90	374
7	0,205	738	130	0

Vrednosti u koloni V_{sc} , su dobijene zamenom odgovarajućih vrednosti u prethodno prikazanu jednačinu:

$$V_{sc1} = 0 + 1278 - 1106 = 172 m^3$$

Za izračunavanje prve vrednosti V_{sc1} , vrednost V_p je jednaka nula zbog toga što se počinje od praznog egalizacionog bazena.

$$V_{sc2} = 172 + 1476 - 1106 = 542 \text{ m}^3$$

Za izračunavanje druge vrednosti u koloni, V_{sc2} , vrednost prisutne zapremine vode u bazenu V_p zapravo predstavlja zaostalu zapreminu vode iz prethodnog časa.

Na isti način se dobijaju i ostale vrednosti u koloni.

Nakon izračunavanja zapremine otpadne vode koja zaostaje u egalizacionom bazenu tokom odgovarajućeg časa, potrebno je izračunati koja se koncentracija zagađenja nalazi u egalizacionom bazenu u toku posmatranog časa, odnosno, koja se količina zagađenja šalje dalje na tretman.

Izlazna koncentracija, odnosno količina zagađenja iz egalizacionog bazena se izračunava na osnovu jednačine:

$$BOD_{iz} = \frac{V_{ul} \cdot BOD_{ul} + V_p \cdot BOD_p}{V_{ul} + V_p}$$

BOD_p je količina zagađenja u prisutnoj zapremini vode u bazenu, a ostale vrednosti su prethodno pomenute.

Vrednosti u koloni BOD_{iz} su dobijene zamenom odgovarajućih vrednosti u datu jednačinu:

$$BOD_{iz1} = \frac{1278 \text{ m}^3 \cdot 175 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + 0 \cdot 0}{1278 \text{ m}^3 + 0} = 175 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

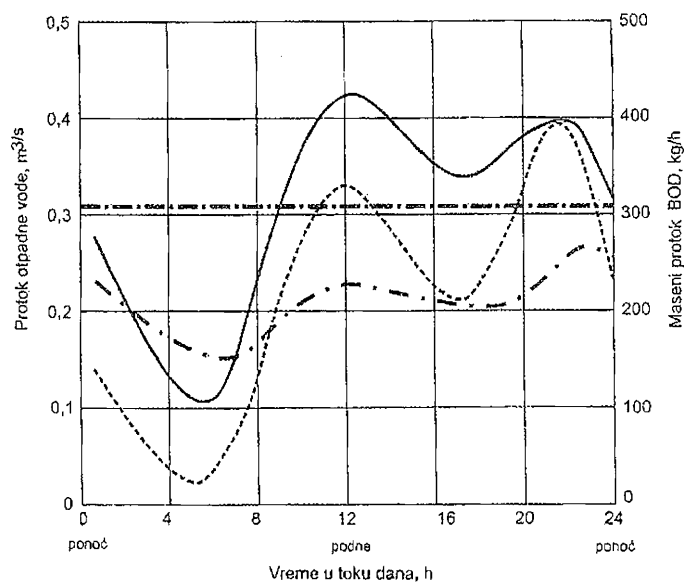
$$BOD_{iz2} = \frac{1467 \text{ m}^3 \cdot 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + 172 \text{ m}^3 \cdot 175 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{1467 \text{ m}^3 + 172 \text{ m}^3} = 197 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

i redom za svaki sat.

Kolona BOD_{iz} , kg/h je dobijena množenjem svake vrednosti u koloni BOD_{iz} , mg/L sa izlaznim protokom.

$t,$ h	$V_{ul},$ m^3	$BOD_{ul},$ mg/L	$V_{sc},$ m^3	$BOD_{iz},$ mg/L	$BOD_{iz},$ kg/h
8	1278	175	172	175	193
9	1476	200	542	197	218
10	1530	215	966	210	232
11	1548	220	1408	216	239
12	1530	220	1832	218	241
13	1458	210	2184	214	237
14	1386	200	2464	209	231
15	1260	190	2618	203	224
16	1170	180	2680	196	217
17	1170	170	2746	188	208
18	1188	175	2828	184	203
19	1314	210	3036	192	212
20	1440	280	3370	220	243
21	1440	305	3704	245	271
22	1368	245	3966	245	271
23	1242	180	4102	230	254
24	990	150	3986	214	237
1	792	115	3972	196	217
2	594	75	3160	179	198
3	468	50	2522	162	179
4	378	45	1794	147	162
5	360	60	1048	132	146
6	432	90	374	119	132
7	738	130	0	126	139

Efekat egalizacije je prikazan na sledećem dijagramu:



Puna crvena linija predstavlja protok otpadne vode koja pristiže na postrojenje, a crvena crta-tačka-crta linija predstavlja efekat egalizacionog bazena, odnosno konstantnu vrednost protoka koji se šalje na tretman.

Isprekidana zelena linija na dijagramu predstavlja količinu zagađenja koja pristiže na postrojenje, dok zelena crta-tačka-crta linija pokazuje ujednačenu količinu zagađenja koja se šalje na tretman. Vidi se da egalizacioni bazen ima uticaj na smanjenje fluktuacije količine zagađenja, što doprinosi stabilnijem radu biološkog tretmana na postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda.

Rešetke

Zadatak 1. Proračunati rešetke sa mehaničkim čišćenjem i pad pritiska na njima, ako su dati sledeći podaci :

Maksimalni protok otpadne vode pri vlažnom vremenu	0,631 m ³ /s
Brzina otpadne vode kroz rešetku pri maksimalnom protoku je	0,90 m/s
Brzina kroz rešetku pri suvom vremenu	0,6 m/s
Ugao rešetke u odnosu na horizontalu	60°
Dubina vode u dolazećoj struji	1,12 m

Rešenje:

1. Definisati ukupnu slobodnu površinu za proticanje otpadne vode i dimenzije rešetke.

Slobodna površina kroz rešetke:

$$A = \frac{Q_{max}}{v} = \frac{0,631}{0,90} = 0,70 \text{ m}^2$$

Širina rešetke u pravcu proticanja:

$$w = \frac{A}{d} = \frac{0,70}{1,12} = 0,625 \text{ m}$$

Usvaja se rastojanje slobodnog prostora u rešetki od 25 mm.

Izračunati broj rešetki na izračunatoj širini i usvojenom rastojanju između rešetki.

$$n = \frac{w}{0,025} = \frac{0,625}{0,025} = 25$$

Usvajaju se 24 rešetke širine 10 mm (0,01 m) i debljine 50 mm.

Sada se računa ukupna širina prostora u kome se smešta rešetka:

Prostor za proticanje vode + Prostor za rešetke

$$\text{Širina} = 0,625 \text{ m} + 0,01 \cdot 24 = 0,86 \text{ m}$$

Dužina rešetke (uračunava nagib pod kojim stoji):

$$Dužina = \frac{1,12 \text{ m}}{\sin 60^\circ} = \frac{1,12}{0,866} = 1,28 \text{ m}$$

Kako je zbog čišćenja, potrebno imati deo rešetke izvan vode od bar $0,6 \text{ m}$ to se na izračunatu dužinu dodaje $0,6 \text{ m}$, odnosno usvaja se dužina rešetke od 2 m .

Koeficijent efiksnosti rešetke se dobija od proizvođača, a može se izračunati i kao odnos širine za proticanje vode i ukupne širine kanala, tj.:

$$EC = \frac{\text{Slobodna površina}}{\text{Širina kanala}} = \frac{0,625}{0,865} = 0,72$$

2. Pad pritiska na rešetki se izračunava po jednačini Kirčmera, pri čemu je za pravougaonu rešetku $B = 1,83$, a odnos $w/b = 1$, pa je:

$$h = B \left(\frac{w}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \frac{v^2}{2g} \sin \theta = 1,83 \cdot 1 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} \sin 60 = 0,067 \text{ m}$$

Napomena: Kako je već naznačeno ova jednačina važi za čistu rešetku. Da bi se aproksimativno odredio pad pritiska kroz rešetku pri zapušenosti rešetke od 50%, usvaja se da će i površina za protok otpadne vode biti smanjena za polovinu, odnosno udvostručiće se brzina vode kroz rešetku, odnosno pad pritiska će porasti 4 puta, tj. iznosio bi približno $0,268 \text{ m}$.

Taloženje

Zadatak 1. Komunalna otpadna voda ulazi u peskolov sa protokom od $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Vreme zadržavanja vode u peskolovu je 3 min , a njegov odnos dubine prema širini je 2:1.

- 1) Odrediti dimenzije peskolova da bi se istaložile čestice inertnog materijala ($d_{in} = 0,2 \text{ mm}$, $\rho_{in} = \frac{2650 \text{ kg}}{\text{m}^3}$, $\beta_{in} = 0,04$), a da se pri tome ne istalože (da se odnesu sa izlaznom strujom vode) organske materije ($d_{org} = 0,2 \text{ mm}$, $\rho_{org} = \frac{1200 \text{ kg}}{\text{m}^3}$, $\beta_{org} = 0,06$).
- 2) Proveriti da li dolazi do taloženja čestica inertnog materijala u stvorenim uslovima.

Podaci: $C_D = 10$, $f = 0,03$

Rešenje:

- 1) Da bi se podesila odgovarajuća brzina vode kroz peskolov potrebno je izračunati brzine vode kojom se odnose obe vrste čestica (horizontalne brzine) kao i brzinu kojom se talože posmatrane inertne čestice.

$$\begin{aligned} V_s(in) &= \left[\frac{4g(\rho_p - \rho)d}{3C_D\rho} \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{4 \cdot 9,81 \cdot (2650 - 1000) \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})}{3 \cdot 10 \cdot 1000} \right]^{1/2} \\ &= 0,0208 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_h(in) &= \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) gd}{f} \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{8 \cdot 0,04 \cdot \left(\frac{2650}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})}{0,03} \right]^{1/2} = 0,186 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_h(org) &= \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) g d}{f} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{8 \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{1200}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})}{0,03} \right]^{1/2} \\
 &= 0,0792 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Za ispunjavanje traženog zadatka odnosno funkcije peskolova, potrebno je da se brzina vode kroz peskolov podesi na vrednost koja je veća od brzine odnošenja organskog materijala, a da je manja od brzine odnošenja inertnog materijala.

$$u_h(org) < u_h < u_h(in)$$

Na osnovu prethodno izračunatih vrednosti usvaja se brzina vode kroz peskolov:

$$u = 0,10 \text{ m/s}$$

Zapremina peskolova se izračunava na osnovu protoka i vremena zadržavanja vode u peskolovu:

$$Q = 400 \frac{m^3}{h} = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

$$V = t \cdot Q = 3 \cdot 60 \cdot 0,11 = 19,8 \text{ m}^3$$

Korišćenjem vrednosti za brzinu vode kroz peskolov moguće je izračunati površinu poprečnog preseka peskolova, odnosno širinu i dubinu peskolova:

$$H : W = 2 : 1$$

$$H = 2W$$

$$u = \frac{Q}{H \cdot W} = \frac{Q}{2 \cdot W^2}$$

$$W = \sqrt{\frac{Q}{2 \cdot u}} = \sqrt{\frac{0,11}{2 \cdot 0,10}} = 0,74 \text{ m}$$

$$H = 2 \cdot W = 2 \cdot 0,74 = 1,48 \text{ m}$$

Na osnovu prethodno dobijenih vrednosti, izračunava se i preostala dimenzija, dužina peskolova:

$$V = W \cdot H \cdot L$$

$$L = \frac{V}{H \cdot W} = \frac{19,8}{1,48 \cdot 0,74} = 18,1 \text{ m}$$

2) Provera, da li dolazi do taloženja inertnih čestica u projektovanom peskolovu, se vrši izračunavanjem kritične brzine taloženja.

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{Q}{L \cdot W} = \frac{H \cdot u}{L} = 0,00818 \text{ m/s}$$

$$V_s = 0,0208 \frac{\text{m}}{\text{s}} > V_0 = 0,00818 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pošto je brzina taloženja veća od kritične brzine taloženja, u peskolovu dolazi do taloženja čestica inertnog materijala.

Zadatak 2. Protok komunalne otpadne vode iznosi $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Potrebno je u peskolovu istaložiti inertan materijal ($d = 0,2 \text{ mm}$, $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$). Dubina vode u peskolovu je $3,5 \text{ m}$. Viskozitet vode iznosi $\mu = 0,00113 \text{ kg/ms}$. Odrediti:

- 1) Potrebno vreme zadržavanja vode u peskolovu da bi se istaložile čestice inertnog materijala. Pretpostaviti da je brzina taloženja posmatranih inertnih čestica jednaka kritičnoj brzini taloženja.
- 2) Sa kojom efikasnošću se talože čestice čija je brzina taloženja $0,0289 \text{ m/s}$.
- 3) Ukoliko se poveća dubina vode u peskolovu na 5 m , sa kojom će se tada efikasnošću istaložiti čestice čija je brzina taloženja $0,0289 \text{ m/s}$.
- 4) Sa kojom efikasnošću i sa koje visine u peskolovu se talože organske čestice ($d = 0,2 \text{ mm}$, $\rho_p = 1500 \text{ kg/m}^3$).

Rešenje:

- 1) Izjednačavanjem kritične brzine taloženja sa brzinom taloženja čestica, izračunava se njena vrednost.

$$\begin{aligned}V_0 = V_s &= \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} \\ &= \frac{9,81 \cdot (2500 - 1000) \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} \\ &= 0,0289 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Deljenjem vrednosti visine peskolova sa vrednošću kritične brzine taloženja dobija se i potrebno vreme zadržavanja inertnih čestica da bi se izvršilo njihovo taloženje.

$$t = \frac{H}{V_0} = \frac{3,5}{0,0289} = 2 \text{ min}$$

- 2) Na osnovu pretpostavke pod a) proizlazi ispunjavanje uslova taloženja,

$$V_s \geq V_0$$

pa je efikasnost taloženja ovih inertnih čestica jednaka 100 %.

- 3) Povećavanjem dubine peskolova, česticama je povećana putanja koju moraju da pređu za isto vreme zadržavanja, pa je zbog toga smanjena njihova efikasnost taloženja.

$$V_s = V_0 = 0,0289 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t = \frac{H_N}{V_{0N}}$$

$$V_{0N} = \frac{H_N}{t} = \frac{5}{2 \cdot 60} = 0,0417 \text{ m/s}$$

$$\eta = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_0}{V_{0N}} = \frac{0,0289}{0,0417} = 0,69 \rightarrow 69\%$$

Brzina taloženja organskih čestica je jednaka:

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81 \cdot (1500 - 1000) \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 0,00965 \text{ m/s}$$

Iz odnosa brzine taloženja organskih čestica i kritične brzine taloženja u ovom peskolovu, dobija se efikasnost taloženja organskih čestica.

$$\eta = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,00965}{0,0289} = 0,333 = 33,3\%$$

- 4) Na osnovu izračunate efikasnosti izračunava se visina u peskolovu ispod koje će se taložiti i organske čestice.

$$\eta = \frac{h}{H}$$

$$h = H \cdot \eta = 3,5 \cdot 0,333 = 1,16 \text{ m}$$

Zadatak 3. U peskolovu zapremine 100 m^3 potrebno je istaložiti inertan materijal prečnika $0,15 \text{ mm}$ i gustine 2550 kg/m^3 . Protok otpadne vode kroz peskolov je 33600 L/min . Izračunati visinu peskolova ako se pretpostavi da se posmatrane čestice inertnog materijala talože sa efikasnošću od 100%. Viskozitet vode iznosi $\mu = 0,00113 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.

Rešenje:

Zbog efikasnosti taloženja od 100% može se uzeti da je brzina taloženja inertnog materijala jednaka kritičnoj brzini taloženja:

$$V_0 = V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81 \cdot (2550 - 1000) \cdot (0,15 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 0,0168 \text{ m/s}$$

$$Q = 33600 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 0,560 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Izračunavanjem i vremena zadržavanja vode, odnosno čestica u peskolovu, dobija se i tražena visina (dubina) peskolova:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{100}{0,560} = 178,6 \text{ s} = 3 \text{ min}$$

$$V_0 = \frac{H}{t}$$

$$H = V_0 \cdot t = 0,0168 \cdot 178,6 = 3 \text{ m}$$

Zadatak 4. Protok otpadne vode kroz peskolov iznosi 400 L/s. Vreme zadržavanja otpadne vode u peskolovu je 3 min. Dužina peskolova je 15 m. Izračunati brzinu proticanja vode kroz peskolov i proveriti da li su stvoreni uslovi za taloženje čestica prečnika 0,18 mm i gustine 2600 kg/m³.

Podaci: $\beta = 0,04$, $f = 0,02$

Rešenje:

Brzina vode u peskolovu se izračunava iz odnosa protoka vode i površine poprečnog preseka peskolova, A , koja se dobija kombinovanjem jednačina u koje su uvrštene dimenzije peskolova:

$$V = Q \cdot t = 400 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 3 \text{ min} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 72 \text{ m}^3$$

$$V = W \cdot H \cdot L$$

$$A = W \cdot H = \frac{V}{L} = \frac{72 \text{ m}^3}{15 \text{ m}} = 4,8 \text{ m}^2$$

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4,8 \text{ m}^2} = 0,083 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Uslov za taloženje je da brzina vode kroz peskolov bude manja od brzine odnošenja čestica, pa poređenjem ove dve vrednosti,

$$\begin{aligned}
 u_h &= \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) g d}{f} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{8 \cdot 0,04 \cdot \left(\frac{2600}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3}}{0,02} \right]^{1/2} \\
 &= 0,213 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

dobija se da je:

$$u < u_h \rightarrow \text{taloženje omogućeno}$$

Zadatak 5. Peskolov prima $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ otpadne vode. U peskolovu je potrebno istaložiti inertne čestice prečnika $0,2 \text{ mm}$, gustine 2300 kg/m^3 i inertne čestice prečnika $0,15 \text{ mm}$ gustine 2000 kg/m^3 . Zapremina peskolova je 60 m^3 , dubina $3,5 \text{ m}$, a dužina $11,4 \text{ m}$. Proveriti da li su stvoreni uslovi za taloženje inertnog materijala, a ako jesu izračunati ostvarenu efikasnost taloženja obe vrste čestica.

Podaci: $\beta = 0,04$, $f = 0,03$, $\mu = 0,00113 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$

Rešenje:

$$\begin{aligned}
 u_{h1} &= \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) g d}{f} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{8 \cdot 0,04 \cdot \left(\frac{2300}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})}{0,03} \right]^{1/2} = 0,165 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{h2} &= \left[\frac{8\beta \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) g d}{f} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{8 \cdot 0,04 \cdot \left(\frac{2000}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot (0,15 \cdot 10^{-3})}{0,03} \right]^{1/2} = 0,125 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$A = \frac{V}{L} = \frac{60}{11,4} = 5,3 \text{ m}^2$$

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{1200}{5,3} = 226,4 \frac{m}{h} = 0,063 \frac{m}{s}$$

$$u < u_f$$

Omogućeni su uslovi za taloženje obe vrste inertnih čestica.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{60}{1200} = 0,05h = 3min = 180 s$$

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{3,5}{180} = 0,019 \frac{m}{s}$$

$$V_{s1} = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81 \cdot (2300 - 1000) \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 0,025m/s$$

$$V_{s2} = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81 \cdot (2000 - 1000) \cdot (0,15 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 0,011m/s$$

$$V_{s1} > V_0 \rightarrow \eta = 100\%$$

$$V_{s2} < V_0 \rightarrow \eta = \frac{V_{s2}}{V_0} = \frac{0,011}{0,019} \cdot 100 = 58\%$$

Zadatak 6. Protok komunalne otpadne vode iznosi $850 m^3/h$. Vreme zadržavanja vode u pravougaonom taložniku je $2h$. Odrediti:

- 1) dimenzije taložnika, širine $7,5 m$ a odnos širine prema visini je $1,5:1$;
- 2) prečnik organskih čestica koje se talože u taložniku brzinom od $0,6 \cdot 10^{-3} m/s$;
- 3) visinu sa koje se talože čestice koje se uklanjaju sa efikasnošću od 50% i kojom brzinom se one talože.

Podaci: $\rho_p = 1250 kg/m^3$, $\mu = 0,00113 kg/ms$

Rešenje:

- 1) Određivanje dimenzija pravougaonog taložnika.

$$W:H = 1,5:1$$

$$W = 1,5H$$

$$H = \frac{7,5}{1,5} = 5m$$

$$t = \frac{V}{Q} \rightarrow V = t \cdot Q = 2 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 0,236 = 1700m^3$$

$$L = \frac{V}{H \cdot W} = \frac{1700}{7,5 \cdot 5} = 45,3m$$

2) Određivanje prečnika čestica koje se talože na osnovu njihove brzine taloženja.

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu}$$

$$d = \sqrt{\frac{V_s \cdot 18 \cdot \mu}{g(\rho_p - \rho)}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 0,00113}{9,81 \cdot (1250 - 1000)}} \\ = 7,054 \cdot 10^{-5}m = 0,0705 mm$$

3) Na osnovu date efikasnosti taloženja od 50% određuje se visina sa koje se posmatrane čestice talože:

$$\eta = \frac{h}{H}$$

$$h = 5 \cdot 0,50 = 2,5m$$

Pomoću date efikasnosti i kritične brzine taloženja može se izračunati brzina kojom se posmatrane čestice talože:

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{5}{2 \cdot 60 \cdot 60} = 6,94 \cdot 10^{-4}m/s$$

$$V_s = \eta \cdot V_0 = 0,50 \cdot 6,94 \cdot 10^{-4} = 3,47 \cdot 10^{-4}m/s$$

Zadatak 7. U taložniku dužine 28 m, dubine 3 m i širine 4,5 m talože se čestice prečnika 0,11 mm i gustine 1300 kg/m³. Vreme zadržavanja otpadne vode u taložniku je 2 h. Viskozitet vode iznosi $\mu = 0,00113 N \cdot s/m^2$. Odrediti:

- 1) Efikasnost taloženja ovih čestica ako je taložnik ispunjen vodom do polovine svog kapaciteta;
- 2) maksimalni mogući protok kroz taložnik i efikasnost taloženja posmatranih čestica u tom slučaju.

Rešenje:

- 1) Kada je taložnik ispunjen do polovine svog kapaciteta, za proračun će se koristiti vrednost polovine dubine taložnika:

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{1,5}{2 \cdot 60 \cdot 60} = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81 \cdot (1300 - 1000) \cdot (0,11 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 0,00175 \text{ m/s}$$

Poređenjem vrednosti brzine taloženja čestica i kritične brzine taloženja dobija se da je efikasnost taloženja:

$$V_s > V_0 \rightarrow \eta = 100\%$$

- 2) Maksimalni mogući protok kroz taložnik se odnosi na količinu vode koja ispunjava ceo mogući kapacitet taložnika. Za razliku od proračuna pod 1), koristiće se cela dubina taložnika:

$$V = WHL = 4,5 \cdot 3 \cdot 28 = 378 \text{ m}^3$$

$$Q_{max} = \frac{V}{t} = \frac{378 \text{ m}^3}{1,5 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 0,0525 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{3}{2 \cdot 60 \cdot 60} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$V_s > V_0 \rightarrow \eta = 100\%$$

Brzina taloženja čestica je veća od kritične brzine pa maksimalan protok kroz taložnik neće uticati na efikasnost taloženja posmatranih čestica, koje se talože sa efikasnošću od 100 %.

Zadatak 8. Koncentracija čestica prečnika $0,02 \text{ mm}$ i gustine 1600 kg/m^3 na ulazu u taložnik iznosi 50 mg/L . Na izlazu iz taložnika koncentracija ovih čestica je iznosila 15 mg/L . Viskozitet vode iznosi $\mu = 0,00113 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$. Odrediti:

- 1) efikasnost taloženja ovih čestica;
- 2) kritičnu brzinu taloženja.

Rešenje:

- 1) Na osnovu koncentracije čestica na ulazu i izlazu iz taložnika može se odrediti količina čestica istaloženih u taložniku, odnosno efikasnost njihovog uklanjanja:

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100 = \frac{50 - 15}{50} \cdot 100 = 70\%$$

- 2) Izračunavanje kritične brzine taloženja.

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu}$$

$$V_s = \frac{9,81 \cdot (1600 - 1000) \cdot (0,02 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 0,00113} = 1,158 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\eta = \frac{V_s}{V_0}$$

$$V_0 = \frac{V_s}{\eta} = \frac{1,158 \cdot 10^{-4}}{0,7} = 1,654 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Zadatak 9. Protok komunalne otpadne vode iznosi $500 \text{ m}^3/\text{h}$. Vreme zadržavanja vode u pravougaonom taložniku je 2 h .

Odrediti:

- 1) Dimenzije taložnika, ako je širina 6 m a odnos širine prema visini je $1,5:1$;
- 2) prečnik organskih čestica koje se talože u taložniku brzinom od $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$;

3) visinu sa koje se talože čestice koje se uklanjaju sa efikasnošću od 50% i kojom se brzinom one talože.

Podaci: $\rho_p = 1250 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00113 \text{ kg/ms}$

Rešenje:

1)

$$W:H = 1,5:1$$

$$W = 1,5H$$

$$H = \frac{6}{1,5} = 4 \text{ m}$$

$$t = \frac{V}{Q} \rightarrow V = t \cdot Q = 2 \cdot 500 = 1000 \text{ m}^3$$

$$L = \frac{V}{H \cdot W} = \frac{1000}{6 \cdot 4} = 42 \text{ m}$$

2)

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu}$$

$$d = \sqrt{\frac{V_s \cdot 18 \cdot \mu}{g(\rho_p - \rho)}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 0,00113}{9,81 \cdot (1250 - 1000)}} \\ = 6,44 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,0644 \text{ mm}$$

3)

$$\eta = \frac{h}{H}$$

$$h = 4 \cdot 0,50 = 2 \text{ m}$$

$$V_0 = \frac{H}{t} = \frac{4}{2 \cdot 60 \cdot 60} = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$V_s = \eta \cdot V_0 = 0,50 \cdot 5,56 \cdot 10^{-4} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Zadatak 10. U taložniku otpadna voda protiče sa $28,53 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Otpadna voda je na temperaturi $15 \text{ }^\circ\text{C}$, a čestice su gustine $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$. Odrediti ukupan procenat uklanjanja čestica ako je u sledećoj tabeli dat težinski udeo čestica i njihova brzina taloženja u funkciji prečnika.

Veličina čestica <i>mm</i>	Težinski udeo čestica većih od datog prečnika %	Brzina taloženja (izračunava se u koraku 1) <i>mm/s</i>
0,10	12	0,968
0,08	18	0,620
0,07	35	0,475
0,06	72	0,349
0,05	86	0,242
0,04	94	0,155
0,02	99	0,039
0,01	100	0,010

Rešenje:

- 1) Na temperaturi od $15 \text{ }^\circ\text{C}$ voda ima sledeće karakteristike:
 $\rho = 999 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu = 0,00113 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$. Primenom jednačine za brzinu taloženja:

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} = \frac{9,81(1200 - 999)d^2}{18 \cdot 0,00113} = 96,942 \cdot d^2 \text{ m/s}$$

moгуće je zamenom vrednosti za prečnik doći do vrednosti brzine taloženja za svaki udeo čestica i na taj način formirati treću kolonu u tabeli.

Za $d = 0,1 \text{ mm} = 0,0001 \text{ m}$

$$V = 96,942 \cdot 0,1^2 = 0,968 \text{ mm/s}$$

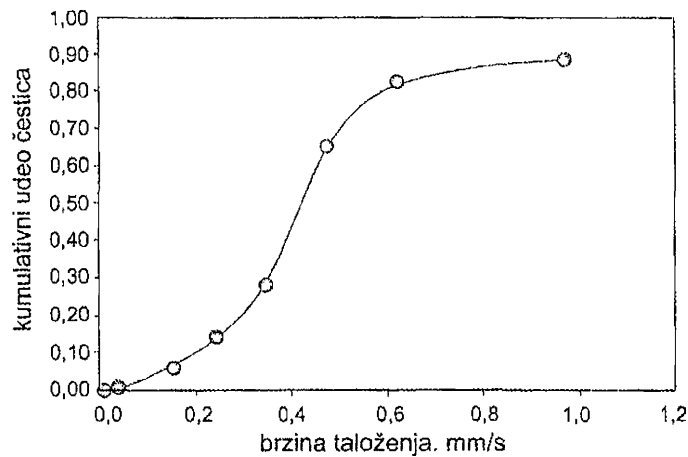
i tako za svaki prečnik.

2) Potom je potrebno nacrtati krivu funkcije brzine taloženja od zbirne težinske distribucije čestica, koja se dobija na osnovu izračunatih vrednosti,

$$\text{Kumulativni udeo} = \frac{(100 - \text{udeo u 2. koloni tabele}) + \text{udeo prethodnih čestica}}{100}$$

V, mm/s	0,01	0,039	0,155	0,242	0,349	0,475	0,620	0,968
Kumulat.udeo	0	0,01	0,06	0,14	0,28	0,65	0,83	0,89

Odnosno grafički predstavljeno:



3) Na osnovu projektovane vrednosti opterećenja taložnika, definisati brzinu taloženja:

$$V_0 = 28,53 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} = \frac{28530}{86400} = 0,33 \frac{mm}{s}$$

što znači da će sve čestice sa brzinom jednakom i većom od 0,33 mm/s biti izdvojene iz vode, pa je iz dijagrama za vrednost 0,33 na apscisi odgovarajuća vrednost na ordinati 0,25, tj.

$$y_0 = 0,25$$

odnosno,

$$1 - y_0 = 0,75$$

- 4) Interval na ordinati od 0,25 se podeli na 6 jednakih inkremenata od po $\Delta y = 0,04$ i još jedan od 0,01 i za svaki se odredi vrednost brzine na apscisi V , izračuna proizvod $V\Delta y$ pa se formira sledeća tabela:

Δy	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01
V	0,09	0,17	0,23	0,26	0,28	0,31	0,33
$V\Delta y$	0,0036	0,0068	0,0092	0,0104	0,0112	0,0124	0,0033

Na kraju se izračuna zbir:

$$\sum V\Delta y = 0,0569$$

- 5) Pošto su poznati svi elementi jednačine za ukupan udeo uklanjanja čestica sa frakcijama datim u ulaznim podacima, zamenom se dobija:

$$F = 1 - y_0 + \frac{1}{V_0} \sum V\Delta y = 1 - 0,25 + \frac{1}{0,33} \cdot 0,0569 = 0,92$$

odnosno 92 % čestica će biti izdvojeno iz otpadne vode u definisanom taložniku.

Agregatno taloženje

Zadatak 11. Primarni taložnik treba isprojektovati da tretira $7570 \text{ m}^3/d$ industrijske otpadne vode koja u sebi sadrži 320 mg/L suspendovanih materija. Za dobijanje podataka taloženja čestica korišćena je kolona prečnika 205 mm i visine $3,05 \text{ m}$, koja je imala na sebi otvore za uzorke na svakih $0,61 \text{ m}$. Rezultati testa su dati u tabeli.

Vreme, min	0,61 m	1,22 m	1,83 m	2,44 m	3,05 m
0	0	0	0	0	0
10	28	18	18	12	a
20	48	39	25	27	a
30	68	50	34	31	a
45	70	56	53	41	a
60	85	66	59	53	a
90	88	82	73	62	a

a –podaci pokazuju porast koncentracije čvrstih materija

Odrediti:

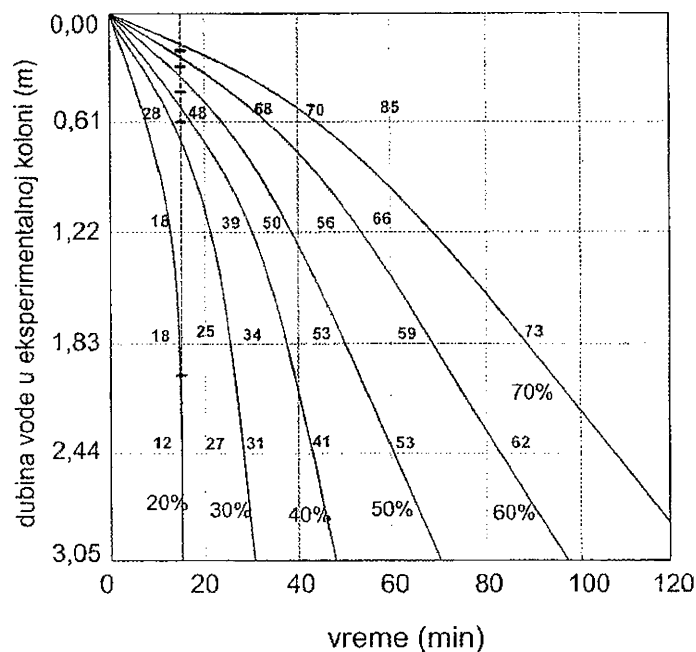
- 1) vreme zadržavanja i površinsko opterećenje ako je potrebno ukloniti 65% suspendovanih materija;
- 2) prečnik i dubinu taložnika.

Rešenje:

Dijagram procentualnog uklanjanja suspendovanih čestica u zavisnosti od dubine i vremena:

Na dijagramu je izvršena interpolacija da bi se nacrtale krive sa 20, 30, 40, 50, 60 i 70% uklanjanja. Kriva od 20% uklanjanja preseca x osu na 16 min , pa u tom vremenu površinsko opterećenje iznosi:

$$\begin{aligned} \text{Površinsko opterećenje} &= \frac{3,05 \text{ m}}{16 \text{ min}} \cdot \frac{1400 \text{ min}}{d} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \\ &= 275 \frac{\text{m}^3}{d \cdot \text{m}^2} \end{aligned}$$



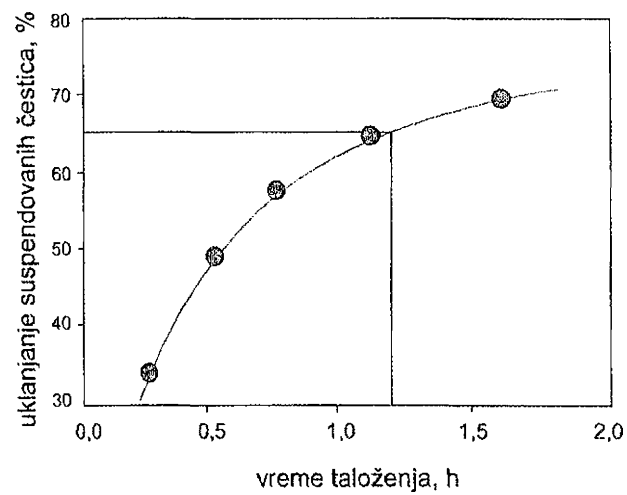
Vreme zadržavanja iznosi 16/60 ili 0,27 h. Tačka na polovini rastojanja između krivih 20 i 30% na 16 min je na dubini od 2,04 m. Na isti način, tačke na polovini rastojanja između krivih 30 i 40, 40 i 50, 50 i 60, 60 i 70% su određene, a odgovarajuće dubine su 0,88, 0,61, 0,40 i 0,24 m. Ove vrednosti daju ukupnu uklonjenu frakciju, R_T , na 16 min (0,27), koja iznosi:

$$\begin{aligned}
 R_T = & 20 + \left(\frac{2,04}{3,05}\right)(30 - 20) + \left(\frac{0,88}{3,05}\right)(40 - 30) \\
 & + \left(\frac{0,61}{3,05}\right)(50 - 40) + \left(\frac{0,40}{3,05}\right)(60 - 50) \\
 & + \left(\frac{0,24}{3,05}\right)(70 - 60) = 33,7 \%
 \end{aligned}$$

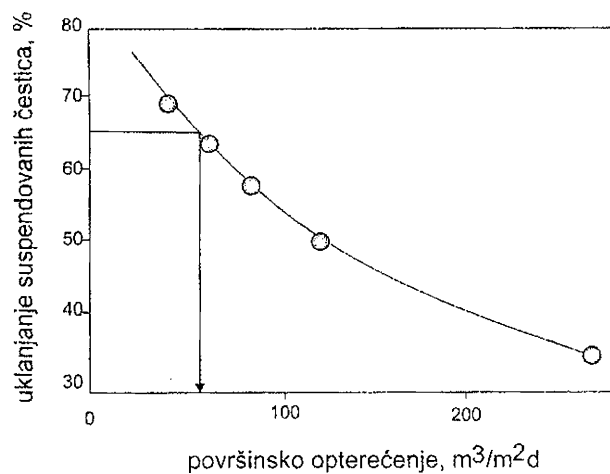
Slično prethodnom, izračunavaju se površinska opterećenja, vremena zadržavanja i ukupne uklonjene frakcije za krive 30, 40, 50, i 60%, što je i prikazano u sledećoj tabeli:

Vreme, t , h	Površinsko opterećenje, $m^3/d \cdot m^2$	Uklonjena frakcija, R_T , %
0,27	275	33,7
0,55	133	48,7
0,77	95,3	56,7
1,13	64,8	63,8
1,60	45,6	68,6

Dijagram uklonjene frakcije, R_T , u zavisnosti vremena t :



Dijagram uklonjene frakcije, R_T u zavisnosti od površinskog opterećenja:



Za uklanjanje od 65% vreme zadržavanja je 1,22 h, pa je projektno vreme zadržavanja jednako $1,22 \cdot 1,75 = 2,14$ h

Sa dijagrama se za vrednost 65% očitava vrednost $58 \text{ m}^3/d \cdot \text{m}^2$, pa je, uračunavajući potreban stepen efikasnosti, projektovano površinsko opterećenje jednako $58,0 \cdot 0,65 = 37,7 \text{ m}^3/d \cdot \text{m}^2$

Zahtevana površina se sada izračunava kao:

$$A = \frac{7570 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{37,7 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{m}^2}} = 201 \text{ m}^2$$

a zahtevani prečnik:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 201} = 16,0 \text{ m}$$

Zahtevana dubina je:

$$H = \frac{7570 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24\text{h}} \cdot 2,14\text{h}}{201 \text{ m}^2} = 3,36 \text{ m}$$

Flotacija

Zadatak 1. Za ugušćavanje čvrste faze u aktivnom mulju, koncentracije 3700 mg/L koristi se flotator sa rastvaranjem vazduha. Protok aktivnog mulja iznosi 400 m³/d. Optimalan odnos A/S iznosi 0,008 mg/mg, a rastvorljivost vazduha je 18,7 mL/L pri radnim uslovima.

- 1) Izračunati zahtevani pritisak za flotaciju. Pretpostaviti da je pritisak pod kojim se vazduh uvodi u vodu veći od 2 atm ($F = 0,5$).
- 2) Ako se vrši flotacija sa recirkulacijom, odrediti protok vode za recirkulaciju.
- 3) Ukoliko se poveća koncentracija čvrstih materija u aktivnom mulju na 5500 mg/L, koliki je tada zahtevani maseni protok vazduha?

Rešenje:

- 1) Pritisak za flotaciju se dobija iz jednačine za izračunavanje potrebne količine vazduha za uklanjanje određene količine čestica, A/S:

$$\frac{A}{S} = 1,3a \frac{(FP - 1)}{X}$$
$$0,008 = 1,3 \cdot 18,7 \cdot \frac{(0,5 \cdot P - 1)}{3700}$$

$$2,22 = 0,5P$$

$$P = 4,4 \text{ atm}$$

- 2) Ukoliko se vrši flotacija sa recirkulacijom, recirkulacioni protok vode se određuje primenom jednačine za određivanje A/S, koja za ovaj slučaj glasi:

$$\frac{A}{S} = 1,3a \left(\frac{Q_r}{Q} \right) \frac{(FP - 1)}{X}$$

Zamenom vrednosti u jednačinu dobija se da je recirkulacioni protok jednak:

$$0,008 = 1,3 \cdot 18,7 \cdot \frac{Q_r}{400} \cdot \frac{(0,5 \cdot 4,4 - 1)}{3700}$$

$$Q_r = 406,1 \frac{m^3}{d}$$

3) Povećanje koncentracije čvrstih materija zahtevaće veću količinu potrebnog vazduha za njihovo uklanjanje.

Kao prvo treba izračunati koliko kg vazduha je potrebno za uklanjanje kg čestica, pri njihovoj povećanoj koncentraciji:

$$\frac{A}{S} = 1,3 \cdot 18,7 \cdot \frac{(0,5 \cdot 4,4 - 1)}{5500} = 0,0053 \frac{kg}{kg}$$

Množenjem koncentracije čvrstih materija sa protokom otpadne vode, dobija se maseni protok čestica:

$$S = 400 \cdot \frac{1 m^3}{24 h} \cdot 5500 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^3} = 91,7 \frac{kg}{h}$$

Pa je potreban protok vazduha:

$$A = \frac{A}{S} \cdot S$$

$$A = 0,0053 \frac{kg}{kg} \cdot 91,7 \frac{kg}{h} = 0,486 \frac{kg}{h}$$

Zadatak 2. Flotaciona komora ima prečnik od $9 m$ i tretira $303 L/min$ otpadnog aktivnog mulja sa koncentracijom TSS od $7800 mg/L$. Protok vazduha koji se uvodi u flotacionu komoru iznosi $170 L/min$. Uzeti da je gustina vazduha $1,2 g/L$. Odrediti:

- 1) hidrauličko opterećenje;
- 2) površinsko opterećenje čvrstim materijama;
- 3) odnos A/S .

Rešenje:

- 1) Hidrauličko opterećenje predstavlja odnos protoka otpadne vode i površine flotacione komore. Flotaciona komora je kružnog oblika pa je površina jednaka:

$$A_p = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{9^2 \pi}{4} = 63,6 m^2$$

Dobija se da je hidrauličko opterećenje:

$$\text{Hidrauličko opterećenje} = \frac{Q}{A_p} = \frac{303 \frac{L}{\text{min}}}{63,6 \text{ m}^2} = 4,76 \frac{L}{\text{min} \cdot \text{m}^2}$$

2) Za izračunavanje površinskog opterećenja čvrstim materijama potrebno je prvo izračunati njihov maseni protok:

$$S = 303 \frac{L}{\text{min}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{h} \cdot 7800 \frac{10^{-6} \text{ kg}}{L} = 141,8 \frac{\text{kg}}{h}$$

Iz odnosa masenog protoka čvrstih materija i površine flotacione komore dobija se vrednost površinskog opterećenja čvrstim materijama:

$$\begin{aligned} \text{Površinsko opterećenje čvrstim materijama} &= \frac{S}{A_p} \\ &= \frac{141,8 \frac{\text{kg}}{h}}{63,6 \text{ m}^2} = 2,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot h} \end{aligned}$$

3) Za izračunavanje odnosa A/S , podatak koji nedostaje je maseni protok vazduha A , koji je potreban za uklanjanje čvrstih materija koje u flotacionu komoru dolaze izračunatim protokom S . Traženi protok vazduha se dobija množenjem protoka vazduha i gustine vazduha:

$$A = 170 \frac{L}{\text{min}} \cdot 1,2 \frac{g}{L} = 204 \frac{g}{\text{min}} = 12,24 \frac{\text{kg}}{h}$$

Deljenjem izračunatih vrednosti dobija se:

$$\frac{A}{S} = \frac{12,24 \frac{\text{kg}}{h}}{141,8 \frac{\text{kg}}{h}} = 0,086 \frac{\text{kg vazduha}}{\text{kg čvrstih materija}}$$

Vrednost A/S pokazuje da je za uklanjanje 1 kg čvrstih materija potrebno 0,086 kg vazduha.

Zadatak 3. Kružni flotacioni bazen ima opterećenje suspendovanim materijama od $3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Protok otpadne vode iznosi $500 \text{ m}^3/\text{d}$. Pritisak pod kojim se obavlja flotacija sa rastvorenim kiseonikom je 3 bara ($F = 0,5$). Ulazna koncentracija suspendovanih materija je 3000 mg/L . Rastvorljivost vazduha je $18,7 \text{ mL/L}$. Odrediti:

- 1) zahtevani maseni protok vazduha;
- 2) prečnik flotacionog bazena.

Rešenje:

- 1) Za izračunavanje protoka vazduha potrebno je prvo izračunati odnos A/S :

$$\frac{A}{S} = 1,3a \frac{(FP - 1)}{X}$$

$$\frac{A}{S} = 1,3 \cdot 18,7 \cdot \frac{(0,5 \cdot 3 - 1)}{3000} = 0,00405 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Maseni protok čestica predstavlja proizvod protoka otpadne vode i koncentracije čvrstih materija u njoj:

$$S = Q \cdot X = 500 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 3000 \frac{10^{-3} \text{kg}}{\text{m}^3} = 1500 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 62,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Maseni protok vazduha iznosi:

$$A = \frac{A}{S} \cdot S = 0,00405 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot 62,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,253 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- 2) Podatak o površinskom opterećenju biće iskorišćen za dobijanje površine flotacione komore:

$$A_p = \frac{S}{\text{opterećenje}} = \frac{62,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}} = 20,8 \text{ m}^2$$

Na osnovu jednačine za izračunavanje površine flotacione komore dobija se i vrednost traženog prečnika:

$$A_p = \frac{D^2 \pi}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20,8}{\pi}} = 5,14 \text{ m}$$

Zadatak 4. Za ugušćivanje aktivnog mulja koncentracije 5000 mg/L koristi se flotacioni bazen prečnika 5 m i dubine $3,5 \text{ m}$. Vreme zadržavanja otpadne vode u flotacionom bazenu je $1,5 \text{ h}$. Ukoliko se utroši $0,005 \text{ kg}$ vazduha za uklanjanje 1 kg čestica, koliko je kg vazduha potrebno da bi se uklonila prisutna količina čestica za dato vreme zadržavanja?

Rešenje:

Vreme zadržavanja otpadne vode je dato. Izračunavanjem zapremine flotacione komore i deljenjem te vrednosti sa vremenom zadržavanja dobija se i protok otpadne vode kroz flotacionu komoru:

$$V = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot H = \frac{5^2 \pi}{4} \cdot 3,5 = 68,7 \text{ m}^3$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{68,7 \text{ m}^3}{1,5 \text{ h}} = 45,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Maseni protok čvrstih materija je jednak:

$$S = 45,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 5000 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 229 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Na osnovu date vrednosti A/S , dobija se maseni protok vazduha:

$$\frac{A}{S} = 0,005 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$A = 0,005 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot 229 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Za dobijanje potrebne količine vazduha u kg , vrednost masenog protoka vazduha će se pomnožiti sa vremenom zadržavanja, jer je to zapravo vreme u kome je određena količina otpadne vode, odnosno materije u vodi, izložene aeraciji u flotacionoj komori.

Tako se dobija masa vazduha od:

$$A = 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,5 \text{ h} = 1,717 \text{ kg}$$

Zadatak 5. U postrojenju za tretman otpadnih voda koristi se flotator sa rastvaranjem vazduha. Protok vazduha je 160 L/min , a njegova gustina iznosi $1,2 \text{ kg/m}^3$. Rastvorljivost vazduha je $18,5 \text{ mL/L}$. Pritisak pod kojim se vrši flotacija iznosi $3,5 \text{ atm}$ ($F = 0,5$). Optimalan odnos A/S je $0,009 \text{ kg/kg}$.

Odrediti:

- 1) ulaznu koncentraciju suspendovanih materija;
- 2) protok otpadne vode kroz flotacionu komoru.

Rešenje:

- 1) Izračunavanje koncentracije suspendovanih materija X :

$$\frac{A}{S} = 1,3a \frac{(FP - 1)}{X}$$

$$0,009 = 1,3 \cdot 18,5 \cdot \frac{(0,5 \cdot 3,5 - 1)}{X}$$

$$X = 2004 \text{ mg/L}$$

- 2) Izračunavanje protoka otpadne vode:

$$A = Q \cdot \rho = 160 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot 1,2 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 192 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 11,52 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$S = \frac{A}{A/S} = \frac{11,52}{0,009} = 1280 \text{ kg/h}$$

$$Q = \frac{S}{X} = \frac{1280 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{2004 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 638,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,177 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Zadatak 6. Ugušćivanje aktivnog mulja u flotacionoj komori se obavlja sa efikasnošću od 70% što dovodi do izlazne koncentracije od 1350 mg/L . Protok otpadne vode sa aktivnim muljem iznosi $600 \text{ m}^3/\text{d}$. Protok vazduha koji se uvodi u flotacionu komoru je 190 L/min a gustina vazduha $1,2 \text{ kg/m}^3$. Odrediti:

- 1) koliki je maseni protok čestica na ulazu u flotacioni bazen;
- 2) Koliko je potrebno kg vazduha za uklanjanje 1 kg čestica.

Rešenje:

- 1) U flotacionoj komori se uklanja 70% čvrstih materija koje ulaze u komoru što znači da izlazna koncentracija čvrstih materija predstavlja 30% od ukupne ulazne koncentracije. Na osnovu ovog podatka dobija se i vrednost koncentracije čestica koje ulaze u komoru:

$$X = \frac{1350 \cdot 100}{30} = 4500 \text{ mg/l}$$

A maseni protok čestica je:

$$S = Q \cdot X$$

$$S = 600 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 4500 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \frac{10^{-3} \text{kg}}{\text{m}^3} = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 112,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2) Izračunavanje A/S :

$$A = Q \cdot \rho = 190 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot \frac{10^{-3} \text{m}^3}{\text{L}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,228 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \\ = 13,68 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\frac{A}{S} = \frac{13,68 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{112,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 0,122 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Zadatak 7. U postrojenju za tretman otpadnih voda se koristi flotator sa rastvaranjem vazduha. Protok vazduha je 135 L/min , a gustina $1,2 \text{ kg/m}^3$. Rastvorljivost vazduha je $17,5 \text{ mL/L}$. Pritisak pod kojim se vrši flotacija iznosi 3 atm ($F = 0,5$). Optimalan odnos A/S je $0,010 \text{ kg/kg}$.

Odrediti:

- 1) ulaznu koncentraciju suspendovanih materija;
- 2) protok otpadne vode kroz flotacionu komoru.

Rešenje:

1)

$$\frac{A}{S} = 1,3a \frac{(FP - 1)}{X}$$
$$0,010 = 1,3 \cdot 17,5 \cdot \frac{(0,5 \cdot 3 - 1)}{X}$$
$$X = 1137,5 \text{ mg/L}$$

2)

$$A = Q \cdot \rho = 135 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot 1,2 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 162 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 9,7 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$
$$S = \frac{A}{A/S} = \frac{9,7}{0,010} = 970 \text{ kg/h}$$
$$Q = \frac{S}{X} = \frac{970 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1137,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 852,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,237 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Zadatak 8. Ugušćivanje aktivnog mulja u flotacionoj komori se obavlja sa efikasnošću od 75% što dovodi do izlazne koncentracije od 1100 mg/L. Protok otpadne vode sa aktivnim muljem iznosi 800 m³/d. Protok vazduha koji se uvodi u flotacionu komoru je 165 L/min a gustina vazduha je 1,2 kg/m³.

Odrediti:

- 1) koliki je maseni protok čestica na ulazu u flotacioni bazen;
- 2) koliko je potrebno kg vazduha za uklanjanje 1 kg čestica.

Rešenje:

1)

$$X = \frac{1100 \cdot 100}{25} = 4400 \text{ mg/L}$$

2)

$$S = Q \cdot X$$

$$S = 800 \frac{m^3}{d} \cdot 4400 \frac{mg}{L} \cdot \frac{10^{-3} kg}{m^3} = 3520 \frac{kg}{d} = 146,7 \frac{kg}{h}$$

$$A = Q \cdot \rho = 165 \frac{L}{min} \cdot \frac{10^{-3} m^3}{L} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} = 0,198 \frac{kg}{min}$$
$$= 11,88 \frac{kg}{h}$$

$$\frac{A}{S} = \frac{11,88 \frac{kg}{h}}{146,7 \frac{kg}{h}} = 0,081 \frac{kg}{kg}$$

Koagulacija i flokulacija

Zadatak 1. Postrojenje za tretman prima $30000 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadne vode. Vreme zadržavanja u bazenu sa brzim mešanjem je 40 s , a u flokulacionom bazenu 30 min . Temperatura vode je $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Pretpostaviti da optimalni gradijent brzine iznosi 800 s^{-1} za brzo mešanje, a za sporo mešanje 40 s^{-1} . Viskozitet otpadne vode na $20 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$.

Odrediti:

- 1) zapreminu bazena sa brzim mešanjem (koagulacioni bazen);
- 2) potrebnu snagu za brzo mešanje;
- 3) zapreminu flokulacionog bazena;
- 4) potrebnu snagu za sporo mešanje.

Rešenje:

- 1) Zapremina bazena sa brzim mešanjem se računa množenjem protoka otpadne vode i vremena njenog zadržavanja u bazenu:

$$V = Q \cdot t = \frac{30\,000 \cdot 40}{60 \cdot 60 \cdot 24} = 13,9 \text{ m}^3$$

- 2) Potrebna snaga za mešanje se izračunava pomoću jednačine za izračunavanje gradijenta brzine, G ,

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = \mu V G^2$$

$$P = (1,002 \cdot 10^{-3}) \cdot 13,9 \cdot 800^2 = 8914 \text{ W} = 8,9 \text{ kW}$$

- 3) Zapremina flokulacionog bazena se računa na isti način kao i zapremina koagulacionog bazena, korišćenjem odgovarajućeg vremena zadržavanja vode u njemu:

$$V = Q \cdot t = \frac{30\,000 \cdot 30}{60 \cdot 24} = 625 \text{ m}^3$$

4) Potrebna snaga za sporo mešanje iznosi:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = \mu V G^2$$

$$P = (1,002 \cdot 10^{-3}) \cdot 625 \cdot 40^2 = 1002 \text{ W} = 1,0 \text{ kW}$$

Zadatak 2. Kvadratni bazen za brzo mešanje, sa dubinom vode 1,25 puta većom od širine, je projektovan da tretira $7570 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadne vode. Rezervoar ima četiri vertikalne pregrade i impeler sa šest krilnih lopatica. Gradijent brzine je 790 s^{-1} , vreme zadržavanja iznosi 40 s, radna temperatura vode je $10 \text{ }^\circ\text{C}$, a broj obrtaja $100 \text{ obrt}/\text{min}$. Odrediti:

- 1) dimenzije bazena;
- 2) zahtevanu snagu;
- 3) prečnik impelera (prečnik impelera treba da bude 30 – 50% širine bazena).

Podaci: $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\rho = 999,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $K_T = 5,75$

Rešenje:

- 1) Izračunavanje dimenzija bazena.

$$V = Q \cdot t = 7570 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 40 \text{ s} \cdot \frac{d}{60 \cdot 60 \cdot 24 \text{ s}} = 3,5 \text{ m}^3$$

$$H = 1,25W$$

$$V = W \cdot W \cdot 1,25W = 1,25W^3$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{V}{1,25}} = \sqrt[3]{\frac{3,5}{1,25}} = 1,41 \text{ m}$$

$$H = 1,25 \cdot 1,41 = 1,76 \text{ m}$$

2) Izračunavanje potrebne snage za mešanje.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V$$

$$P = 790^2 \frac{1}{s^2} \cdot 0,00131 \frac{N \cdot s}{m^2} \cdot 3,5 m^3 = 2862 \frac{N \cdot m}{s} = 2862 W$$

3) Za mešanje se koristi propelerska mešalica pa se za izračunavanje snage može koristiti jednačina:

$$P = K_T n^3 D_i^5 \rho$$

U prikazanoj jednačini, pored gustine vode, broja obrtaja i konstante za turbulentno mešanje figuriše i prečnik mešalice, koji je jednak:

$$D_i = \sqrt[5]{\frac{P}{K_T n^3 \rho}}$$

$$n = 100 \text{ obrt/min} = \frac{100}{60} = 1,67 \text{ obrt/s}$$

$$D_i = \sqrt[5]{\frac{2862}{5,76 \cdot 1,67^3 \cdot 999,7}} = 0,640 \text{ m}$$

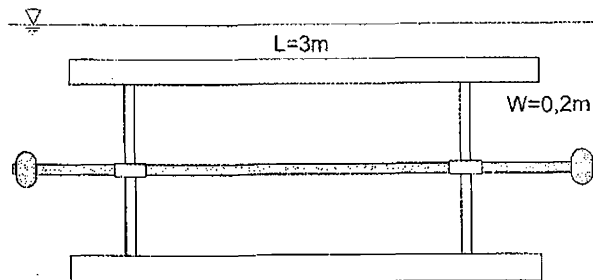
$$\frac{D_i}{W} = \frac{0,640}{1,41} = 0,45 = 45\%$$

Na osnovu odnosa prečnika mešalice i širine bazena, dobijeno je da prečnik mešalice čini 45% širine bazena što je u skladu sa zahtevom (30-50%).

Zadatak 3. 1) Projektovan je bazen za koagulaciju sa četiri pregrade i impelerima sa četiri krilne lopatice. Zapremina bazena je jednaka 4 m^3 , dužina $1,3 \text{ m}$, a dubina 2 m . Prečnik impelera je 35% od širine

koagulacionog bazena. Impeler ima 90 obrtaja u minuti. Koliki je gradijent brzine u ovom koagulacionom bazenu?

2) Nakon koagulacionog bazena sledi flokulacioni bazen, sa četiri komore sa po četiri točka na horizontalnom vratiju. Točkovi imaju po par lopatica istih veličina (slika). Faktor trenja C_D za lopatice iznosi 1,5. Relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode je $0,69 \text{ m/s}$. Kolika je ukupna snaga potrebna za mešanje u flokulacionom bazenu, ako se pretpostavi da je gradijent brzine isti u sve četiri komore?



Podaci: $K_T = 5,31$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$

Rešenje:

1) Izračunavanje gradijenta brzine.

$$V = WHL$$

$$W = \frac{V}{HL} = \frac{4 \text{ m}^3}{1,3 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}} = 1,5 \text{ m}$$

$$D_i = 0,35 \cdot 1,5 \text{ m} = 0,52 \text{ m}$$

$$P = K_T n^3 D_i^5 \rho$$

$$n = \frac{90}{60} = 1,5 \frac{1}{\text{s}}$$

$$P = 5,31 \cdot 1,5^3 \cdot 0,52^5 \cdot 1000 = 681 \text{ W}$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{681}{0,00131 \cdot 4}} = 360,5 \text{ s}^{-1}$$

2) Kao prvo je potrebno izračunati ukupnu površinu lopatica. Svaki točak ima po dve lopatice pa je površina lopatica po točku jednaka:

$$A = 2 \cdot (0,2 \cdot 3) = 1,2 \text{ m}^2$$

Kada su u pitanju lopatasti mešaći snaga po točku se računa na osnovu jednačine:

$$P_T = C_D A \rho \frac{v^3}{2}$$

Relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode, v , je data zadatkom, pa zamenom svih vrednosti parametara koji figurišu u jednačini dobija se vrednost snage po točku:

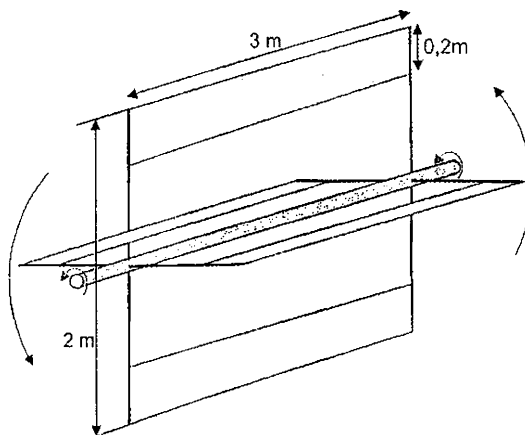
$$P_T = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot \frac{0,69^3}{2} = 296 \text{ W}$$

Flokulacioni bazen ima četiri komore sa po četiri točka. Da bi se dobila ukupna snaga koja je potrebna za mešanje u celom flokulacionom bazenu potrebno je snagu za jedan točak pomnožiti sa 4, da bi se dobila potrebna snaga za jednu komoru, pa potom snagu za jednu komoru pomnožiti opet sa 4, da bi se dobila ukupna tražena snaga koja na kraju iznosi:

$$P = 4 \cdot 4 \cdot P_T = 4 \cdot 4 \cdot 296 \text{ W} = 4736 \text{ W}$$

Zadatak 4. Postrojenje za tretman prima $30000 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadne vode. Vreme zadržavanja u flokulacionom bazenu iznosi 40 min . Pretpostaviti da optimalni gradijent brzine u svakoj komori iznosi 40 s^{-1} . Flokulator se sastoji od četiri komore, a svaka komora ima po tri točka. Na točkovima se nalaze dva para lopatica normalno postavljenih u međusobnom odnosu (slika). Lopatice su istih dimenzija pa je faktor trenja za sve lopatice isti i jednak 1,5. Izračunati broj obrtaja u minuti jednog točka, ako je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode 70% periferne brzine lopatice.

Podaci: $\rho = 999,7 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$



Rešenje:

Izračunavanje zapremine flokulacionog bazena.

$$V = Q \cdot t = 30000 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24 \cdot 60min} \cdot 40 min = 833,3 m^3$$

Da bi se dobila snaga za jednu komoru, zapremina koja figuriše u jednačini za izračunavanje snage će biti podeljena na 4, zbog toga što bazen ima 4 komore istih dimenzija. Pa je snaga za jednu komoru jednaka:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 40^2 \cdot 0,00131 \cdot \frac{833,3}{4} = 436,6 W$$

Pošto svaka komora ima po tri točka, snaga po komori biće podeljena sa 3 jer se u svakoj komori nalazi po tri točka sa lopaticama. Tada snaga po točku iznosi:

$$P_T = \frac{P}{3} = \frac{436,6}{3} = 145,5 W$$

Na svakom točku se nalazi po četiri lopatice istih dimenzija (slika), pa je ukupna površina lopatica po točku jednaka:

$$A = 4 \cdot (0,2 \cdot 3) = 2,4 m^2$$

Tekstom zadatka je dato da je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode, 70% periferne brzine:

$$v = 0,7 v_p$$

Periferma brzina lopatice se računa pomoću jednačine:

$$v_p = n\pi D$$

Pa se zamenom dobija da je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode jednaka:

$$v = 0,7 \cdot n \cdot \pi \cdot D = 0,7 \cdot n \cdot \pi \cdot 2 = 4,4 n$$

Zamenom poznatih vrednosti u jednačinu za izračunavanje snage po točku,

$$P = C_D A \rho \frac{v^3}{2}$$

$$145,5 = 1,50 \cdot 2,4 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4,4^3 \cdot n^3$$

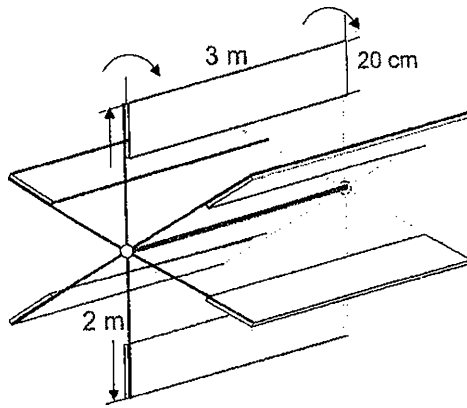
proizilazi vrednost broja obrtaja točka u minuti:

$$n = \sqrt[3]{9,49 \cdot 10^{-4}}$$

$$n = 0,0983 \frac{1}{s} = 5,9 \frac{1}{min}$$

Zadatak 5. U postrojenje na tretman dolazi $27600 \text{ m}^3/d$ otpadne vode. Vreme zadržavanja u flokulacionom bazenu iznosi 30 min . Pretpostaviti da optimalni gradijent brzine iznosi 50 s^{-1} . Flokulator se sastoji od četiri komore, a svaka komora ima po četiri točka. Na točkovima se nalaze tri para lopatica zrakasto postavljenih (slika). Lopatice su istih dimenzija i nalaze se na istom rastojanju od centra osovine. Faktor trenja za sve lopatice je isti i jednak 1,5. Izračunati broj obrtaja u minuti jednog točka, ako je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode 77% periferne brzine lopatice.

Podaci: $\rho = 999,7 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$



Rešenje:

$$V = Q \cdot t = 27600 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24 \cdot 60 \text{ min}} \cdot 30 \text{ min} = 575 m^3$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 50^2 \cdot 0,00131 \cdot \frac{575}{4} = 470,8 W$$

$$P_T = \frac{P}{4} = \frac{470,8}{4} = 117,7 W$$

$$P = C_D A \rho \frac{v^3}{2}$$

$$A = 6 \cdot (0,2 \cdot 3) = 3,6 m^2$$

$$v = 0,77 \cdot n \cdot \pi \cdot D = 0,77 \cdot n \cdot \pi \cdot 2 = 4,84 n$$

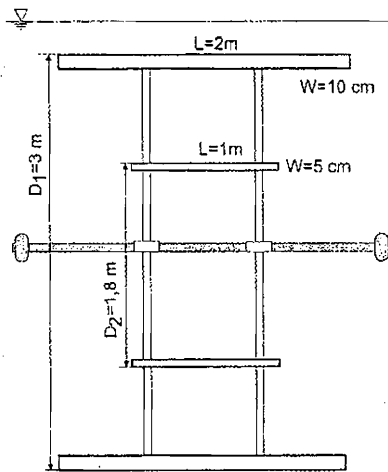
$$117,7 = 1,50 \cdot 3,6 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4,84^3 \cdot n^3$$

$$n = \sqrt[3]{3,85 \cdot 10^{-4}}$$

$$n = 0,0727 \frac{1}{s} = 4,36 \frac{1}{\text{min}}$$

Zadatak 6. U bazen za flokulaciju pristiže $11000 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadne vode na tretman. Vreme zadržavanje otpadne vode u bazenu je 30 min . Flokulacioni bazen ima tri komore sa po tri točka na kome se nalaze dva para lopatica različitih dimenzija (slika). Koeficijent trenja za oba para lopatica je isti i iznosi $1,50$. Gradijent brzine u svakoj komori iznosi 40 s^{-1} . Izračunati broj obrtaja u minuti jednog točka, ako je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode 80% periferne brzine lopatice.

Podaci: $\rho = 999,7 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$



Rešenje:

Izračunavanje potrebne snage po točku:

$$V = t \cdot Q = 30 \text{ min} \cdot 11000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \cdot 60 \text{ min}} = 229 \text{ m}^3$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 40^2 \cdot 0,00131 \cdot \frac{229}{3} = 160 \text{ W}$$

$$P_T = \frac{P}{3} = \frac{160}{3} = 53,3 \text{ W}$$

Treba voditi računa o strukturi lopatica na točku. Sa slike se vidi da točak ima po dva para lopatica koje se razlikuju po dimenzijama kao i po rastojanju od centra osovine. Zbog ovoga će jednačina za izračunavanje snage po točku imati ovaj oblik:

$$P_T = C_D A_1 \rho \frac{v_1^3}{2} + C_D A_2 \rho \frac{v_2^3}{2}$$

Različite veličine lopatica imaju različite površine:

$$A_1 = 2 \cdot (2 \cdot 0,1) = 0,4 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2 \cdot (1 \cdot 0,05) = 0,1 \text{ m}^2$$

Različito rastojanje od centra osovine, D , utiče na različite vrednosti perifernih brzina:

$$v_1 = 0,8 \cdot n \cdot \pi D_1 = 0,8 \cdot n \cdot \pi \cdot 3 = 7,5 n$$

$$v_2 = 0,8 \cdot n \cdot \pi D_2 = 0,8 \cdot n \cdot \pi \cdot 1,8 = 4,5 n$$

Zamenom vrednosti u jednačinu za izračunavanje snage po točku, dobija se i vrednost za brzinu okretanja točka u minuti:

$$53,3 = 1,50 \cdot 0,4 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 7,5^3 \cdot n^3 + 1,50 \cdot 0,1 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4,5^3 \cdot n^3$$

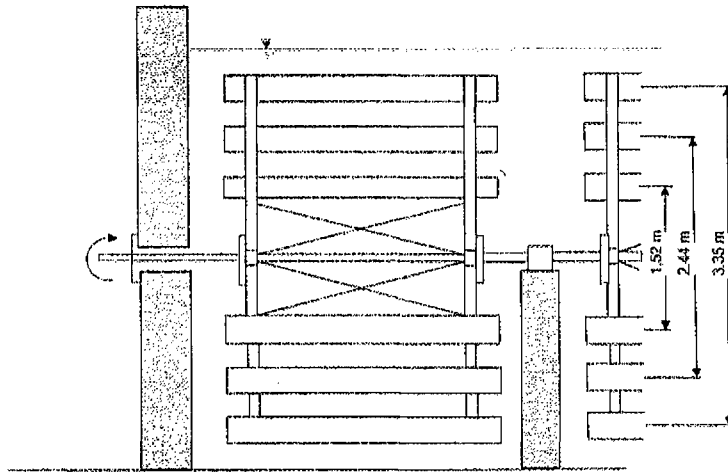
$$n = \sqrt[3]{4,0 \cdot 10^{-4}}$$

$$n = 0,0737 \frac{1}{s} = 4,42 \frac{1}{min}$$

Zadatak 7. Bazen za flokulaciju je projektovan da preradi $25000 \text{ m}^3/d$ otpadne vode. Bazen se sastoji od tri komore jednakih dubina, povezanih u seriju. U svakoj od komora se nalazi po jedno horizontalno vratilo koje na sebi ima četiri točka sastavljenih od po šest lopatica. Svaka lopatica je široka 15 cm a dugačka $3,0 \text{ m}$. Vreme zadržavanja je 45 minuta. Vrednost G_t treba da se kreće u opsegu od 50 000 do 100 000 (slika). Vrednosti G za sve tri komore su dobijene na osnovu

laboratorijskih testova i iznose 50 s^{-1} , 20 s^{-1} , 10 s^{-1} . Na osnovu ovih vrednosti dobijena je srednja vrednost gradijenta brzine G od $26,7 \text{ s}^{-1}$. Širina flokulacionog bazena iznosi 15 m . Relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode je $3/4$ periferne brzine lopatice. Viskozitet otpadne vode čija je temperatura 10°C iznosi $0,00131 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Odrediti:

- 1) vrednost G_t ;
- 2) dimenzije bazena;
- 3) ukupnu površinu lopatica po komori;
- 4) snagu koja se saopštava u svakoj komori;
- 5) broj obrtaja svakog točka sa lopaticama ($rpm = 1/min$).



Rešenje:

- 1) Izračunavanje G_t .

$$G_t = G \cdot t = 26,7 \frac{1}{s} \cdot 45 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 72\,090$$

Pošto se vrednost G_t nalazi unutar opsega $50\,000 - 100\,000$, vreme zadržavanja od 45 minuta je zadovoljavajuće.

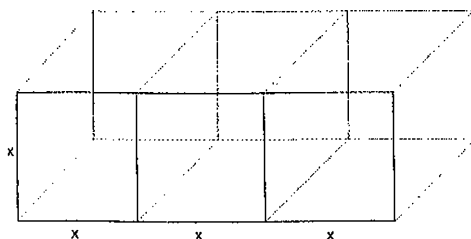
- 2) Izračunavanje dimenzija bazena.

$$V = Q \cdot t = 25\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 45 \text{ min} \frac{\text{d}}{60 \cdot 24 \text{ min}} = 781,2 \text{ m}^3$$

Površina čeonog poprečnog preseka bazena je tada jednaka:

$$A = \frac{V}{W} = \frac{781,2}{15} = 52,08 \text{ m}^2$$

Za proračun je potrebno pretpostaviti da su komore kvadratnog oblika u čeonom preseku i da je sa x obeležena širina i dubina komore.



Tada sledi,

$$(3x) \cdot x = 52,08 \text{ m}^2$$

$$x^2 = 17,36 \text{ m}^2$$

$$x = 4,167 \text{ m}$$

$$H = L_k = 4,167 \text{ m}$$

$$L = 3x = 3 \cdot 4,17 = 12,5 \text{ m}$$

$$V = 4,167 \cdot 12,5 \cdot 15,0 = 781,2 \text{ m}^3$$

- 3) Komora se sastoji od jednog horizontalnog vratila na kome su smeštena 4 točka, a na svakom točku se nalazi po 6 jednakih lopatica. Da bi se dobila ukupna površina lopatica po komori, odnosno vratilu, potrebno je površinu jedne lopaticice pomnožiti sa 6 da bi se dobila površina lopatica po točku, pa potom dobijenu vrednost pomnožiti sa 4 da bi se dobila ukupna površina lopatica po komori.

$$\text{Površina lopatica po vratilu} = 0,15 \cdot 3,0 \cdot 6 \cdot 4 = 10,8 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Procenat površine poprečnog preseka} &= \frac{10,8}{(15 \cdot 4,17)} \\ &= 17,3\% \end{aligned}$$

Dobijena vrednost se nalazi između 15 i 20 %, što znači da odabrane dimenzije lopatica zadovoljavaju preporučeni, empirijski određeni, uslov.

4) Gradijenti brzina se razlikuju u svakoj komori, pa se samim tim razlikuju i snage koje se saopštavaju svakoj komori.

Snaga za komoru 1.

$$\begin{aligned} G_1 &= 50 \text{ s}^{-1} \\ P &= G^2 \cdot \mu \cdot V \\ P_1 &= 50^2 \cdot \frac{1}{\text{s}^2} \cdot 0,00131 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{781,2}{3} \text{m}^3 = 852,8 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \\ &= 852,8 \text{ W} \end{aligned}$$

Snaga za komoru 2.

$$\begin{aligned} G_2 &= 20 \text{ s}^{-1} \\ P_2 &= 20^2 \cdot \frac{1}{\text{s}^2} \cdot 0,00131 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{781,2}{3} \text{m}^3 = 136,4 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \\ &= 136,4 \text{ W} \end{aligned}$$

Snaga za komoru 3.

$$\begin{aligned} G_3 &= 10 \text{ s}^{-1} \\ P_3 &= 10^2 \cdot \frac{1}{\text{s}^2} \cdot 0,00131 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{781,2}{3} \text{m}^3 = 34,1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \\ &= 34,1 \text{ W} \end{aligned}$$

5) U prethodnom koraku dobijene su snage koje se saopštavaju svakoj komori. Zbog različitih vrednosti saopštenih snaga po komori može se zaključiti da će i točkovi sa lopaticama imati različite brzine obrtanja u zavisnosti u kojoj se komori nalaze;

Snaga po jednom točku u komori 1:

$$P_T = \frac{P}{4} = \frac{852,8}{4} = 213,2 \text{ W}$$

$$P = C_D A \rho \frac{v^3}{2}$$

Ukoliko koeficijent trenja nije dat, on se može izračunati iz odnosa dužine prema širini lopatice i korišćenjem podataka iz tabele 3.3:

$$\text{Odnos dužine prema širini lopatice: } \frac{3,0}{0,15} = 20$$

$$\rightarrow \text{tabela 3.3} \rightarrow C_D = 1,50$$

Relativna brzina lopatice u odnosu na vodu:

$$v = 0,75 \cdot n \pi D$$

$$v_1 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 3,35 = 7,89 n$$

$$v_2 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 2,44 = 5,75 n$$

$$v_3 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 1,52 = 3,58 n$$

Snaga po jednom točku je jednaka:

$$P_T = C_D A_1 \rho \frac{v_1^3}{2} + C_D A_2 \rho \frac{v_2^3}{2} + C_D A_3 \rho \frac{v_3^3}{2}$$

Lopatice na točku su istih dimenzija pa su i površine određenih parova lopatica jednake:

$$A_1 = A_2 = A_3 \rightarrow A = 2 \cdot (0,15 \cdot 3,0)$$

Zbog razlike u rastojanju od centra osovine svaki par lopatica ima određenu vrednost periferne brzine, pa jednačina za izračunavanje snage po točku glasi:

$$P_T = C_D A \rho \frac{1}{2} (v_1^3 + v_2^3 + v_3^3)$$

Zamenom vrednosti dobija se broj obrtaja točka u prvoj komori:

$$213,2 = 1,50 \cdot 2 \cdot (0,15 \cdot 3,0) \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot (7,89^3 \cdot n^3 + 5,75^3 \cdot n^3 + 3,58^3 \cdot n^3)$$

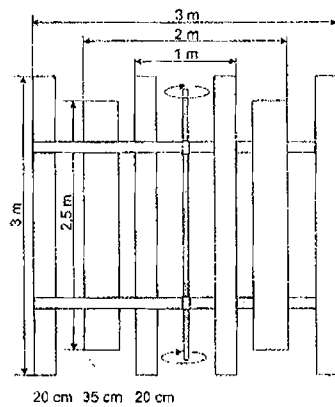
$$213,2 = 674,8 \cdot 727,2 \cdot n^3$$

$$n = \sqrt[3]{4,34 \cdot 10^{-4}}$$

$$n = 0,0757 \frac{1}{s} = 4,54 \frac{1}{min}$$

✓ Istim postupkom se dobija i broj obrtaja točkova sa lopaticama u drugoj i trećoj komori.

Zadatak 8. Protokom od $20570 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadna voda pristiže na postrojenje za prečišćavanje. Vreme zadržavanja u flokulacionom bazenu iznosi 35 min . Flokulator se sastoji od četiri komore, a svaka komora ima po tri točka. Pretpostaviti da optimalni gradijent brzine u svakoj komori iznosi 50 s^{-1} . Svaki točak ima po vratilo sa šest lopatica (slika). Za sve lopatice može se uzeti da je faktor trenja jednak 1,5. Izračunati broj obrtaja u minuti jednog točka, ako je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode 75% periferne brzine lopaticice. Podaci: $\rho = 999,7 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$



Rešenje:

$$V = t \cdot Q = 35 \text{ min} \cdot 20570 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \cdot 60 \text{ min}} = 500 \text{ m}^3$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 50^2 \cdot 0,00131 \cdot \frac{500}{4} = 409,4 \text{ W}$$

$$P_T = \frac{P}{3} = \frac{409,4}{3} = 136,5 \text{ W}$$

$$P_T = C_D A_1 \rho \frac{v_1^3}{2} + C_D A_2 \rho \frac{v_2^3}{2} + C_D A_3 \rho \frac{v_3^3}{2}$$

$$A_1 = A_3 = 2 \cdot (3 \cdot 0,20) = 1,2 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2 \cdot (2,5 \cdot 0,35) = 1,75 \text{ m}^2$$

$$v_1 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot D_1 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 1 = 2,36 \text{ n}$$

$$v_2 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 2 = 4,71 \text{ n}$$

$$v_3 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot D_3 = 0,75 \cdot n \cdot \pi \cdot 3 = 7,07 \text{ n}$$

$$P_T = C_D A_1 \rho \frac{1}{2} (2,36^3 \cdot n^3) + C_D A_2 \rho \frac{1}{2} (4,71^3 \cdot n^3) + C_D A_3 \rho \frac{1}{2} (7,07^3 \cdot n^3)$$

$$136,5 = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot (13,14 \cdot n^3) + 1,5 \cdot 1,75 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot (104,5 \cdot n^3) + 1,5 \cdot 1,2 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot (353,4 \cdot n^3)$$

$$136,5 = 11822,5 \cdot n^3 + 137115,1 \cdot n^3 + 317964,6 \cdot n^3$$

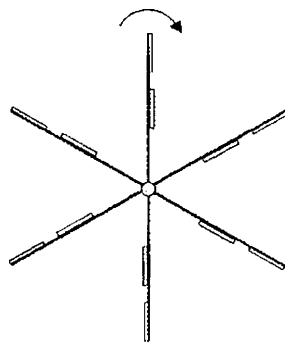
$$n^3 = 2,92 \cdot 10^{-4}$$

$$n = \sqrt[3]{2,92 \cdot 10^{-4}}$$

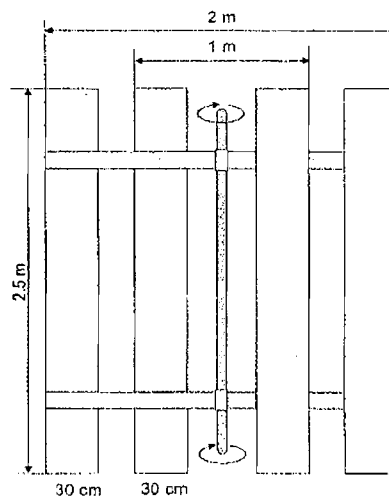
$$n = 0,066 \frac{1}{s} = 3,98 \frac{1}{min} \approx 4 \frac{1}{min}$$

Zadatak 9. Postrojenje za tretman prima $10800 \text{ m}^3/\text{d}$ otpadne vode. Vreme zadržavanja u flokulacionom bazenu iznosi 40 min . Flokulator se sastoji od tri komore, a svaka komora ima po tri točka. Pretpostaviti da optimalni gradijent brzine u svakoj komori iznosi 45 s^{-1} . Na točku se nalazi po tri vratila sa po četiri lopatice (slika). Za sve lopatice se može uzeti da je faktor trenja jednak 1,5. Izračunati broj obrtaja u minuti jednog točka, ako je relativna brzina lopatica u odnosu na brzinu vode 80% periferne brzine lopatice.

Podaci: $\rho = 999,7 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$



Pogled odozgo



Vratilo sa četiri lopatice

Rešenje:

$$V = t \cdot Q = 40 \text{ min} \cdot 10800 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{d}{24 \cdot 60 \text{ min}} = 300 \text{ m}^3$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 45^2 \cdot 0,00131 \cdot \frac{300}{3} = 265,3 \text{ W}$$

$$P_T = \frac{P}{3} = \frac{265,3}{3} = 88,4 \text{ W}$$

$$P_T = C_D A_1 \rho \frac{v_1^3}{2} + C_D A_2 \rho \frac{v_2^3}{2}$$

$$A = 3 \cdot 4 \cdot (2,5 \cdot 0,30) = 9,0 \text{ m}^2$$

$$v_1 = 0,80 \cdot n \cdot \pi \cdot D_1 = 0,80 \cdot n \cdot \pi \cdot 1 = 2,51 \text{ n}$$

$$v_2 = 0,80 \cdot n \cdot \pi \cdot D_2 = 0,80 \cdot n \cdot \pi \cdot 2 = 5,03 \text{ n}$$

$$P_T = C_D A \rho \frac{1}{2} (v_1^3 + v_2^3)$$

$$P_T = 1,5 \cdot 9 \cdot 999,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot (15,81 \cdot n^3 + 127,3 \cdot n^3)$$

$$88,4 = 965702,7 \cdot n^3$$

$$n^3 = 9,15 \cdot 10^{-5}$$

$$n = \sqrt[3]{9,15 \cdot 10^{-5}}$$

$$n = 0,045 \frac{1}{s} = 2,7 \frac{1}{min}$$

Hemijska precipitacija

Zadatak 1. Odrediti povećanje mase i zapremine proizvedenog mulja iz netretirane otpadne vode, bez i sa korišćenjem feri-hlorida, radi boljeg uklanjanja TSS, kao i povećanje količine kreča potrebnog za specifične doze feri-hlorida.

Pretpostaviti da se 60% TSS uklanja u primarnom taložniku bez dodavanja hemikalija, a da feri hlorid dodat nakon toga, omogućava uklanjanje TSS do 85%. Takođe, pretpostaviti i sledeće podatke:

1. Protok otpadne vode, m^3/d	1000
2. TSS u otpadnoj vodi, mg/L	200
3. Alkalitet kao $CaCO_3$, mg/L	136
4. Feri hlorid, dodat, $kg/1000 m^3$	40
5. Karakteristike sirovog mulja	
Specifična težina	1,03
Sadržaj vlage,%	94
6. Karakteristike hemijskog mulja	
Specifična težina	1,05
Sadržaj vlage,%	92,5

Rešenje:

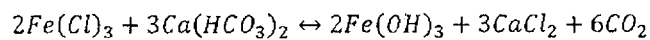
Određivanje količine TSS koja je uklonjena u primarnom taložniku bez dodavanja hemikalija:

$$M_{TSS} = 0,6 \cdot 220 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^3} \cdot 1000 \frac{m^3}{d} = 132 \frac{kg}{d}$$

Određivanje uklonjene mase TSS sa dodatkom hemikalija:

$$M_{TSS} = 0,85 \cdot 220 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^3} \cdot 1000 \frac{m^3}{d} = 187 \frac{kg}{d}$$

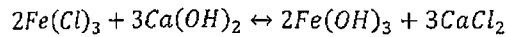
Primenom jednačine,



može se odrediti masa feri-hidroksida nastalog dodavanjem $40 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3$ feri hlorida.

$$\text{nastali } Fe(OH)_3 = 40 \cdot \frac{2 \cdot 106,9}{2 \cdot 162,2} = 26,4 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3$$

Primenom jednačine,



određuje se masa kreča potrebnog za prevođenje $Fe(Cl)_3$ u $Fe(OH)_3$:

$$\text{Potreban kreč} = 40 \cdot \frac{3 \cdot 56}{2 \cdot 162,2} = 20,7 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3$$

Zbog postojanja dovoljne prirodne alkalnosti, u ovom slučaju, nije potrebno dodavanje kreča.

Određivanje ukupne količine suvog mulja nastalog iz hemijske precipitacije:

$$\text{Ukupni suvi mulj} = 187 + 26,4 = 213,4 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3$$

Određivanje ukupne zapremine mulja nastalog iz hemijske precipitacije uz pretpostavku da mu je specifična težina 1,05, a sadržaj vlage 92,5%:

$$V_s = \frac{213,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{1,05 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,075} = 2,71 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Određivanje ukupne zapremine mulja nastalog bez hemijske precipitacije uz pretpostavku da mu je specifična težina 1,03, a sadržaj vlage 94%:

$$V_s = \frac{132 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{1,03 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,06} = 2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Tabelarni prikaz mase i zapremine mulja sa i bez hemijske precipitacije:

Tretman	Mulj	
	Masa, kg/d	Zapremina, m ³ /d
Bez hemijske precipitacije	132	2,13
Sa hemijskom precipitacijom	213,4	2,71

Važan problem odlaganja mulja kada se koriste hemikalije je evidentan i vidi se iz podataka datih u tabeli, da se još veća zapremina mulja produkuje kad se koristi kreč kao primarni precipitant.

Zadatak 2. Odrediti količinu stipse (aluminijum-sulfata) potrebne za taloženje fosfora iz otpadne vode koja sadrži 8 mg P/l. Odrediti i potrebne kapacitete za skladištenje stipse, radi obezbeđenja 30-to dnevnog snabdevanja na postrojenju za tretman otpadnih voda. Laboratorijskim testovima je utvrđeno da je 1,5 mol Al dovoljan za 1 mol P. Protok otpadne vode je 12000 m³/d. Sledeći podaci se odnose na stipsu:

- formula je $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
- jačina tečne stipse 48%
- gustina rastvora 1,2kg/L

Rešenje:

Određivanje težine raspoložive stipse na litar tečne stipse:

Težina stipse po litru je:

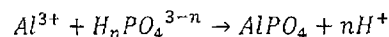
$$stipsa/L = (0,48)(1,2kg/L) = 0,576kg/L$$

Težina aluminijuma po litru je:

(Molekulska težina stipse je 666,5)

$$Al/L = 0,58 \cdot \left(2 \cdot \frac{26,98}{666,6} \right) = 0,0466kg/L$$

Određivanje težine potrebnog aluminijuma za jediničnu težinu fosfora:



Teoretske doze = 1 mol Al na 1 mol P

Potreban aluminijum = 1 kg · (mw Al/mw P)

$$= 1 \text{ kg} \cdot \left(\frac{26,98}{30,97} \right) = 0,87 \text{ kg Al/kg P}$$

Određivanje količine rastvora stipse potrebne za kg fosfora:

$$\begin{aligned} \text{Doza stipse} &= 1,5 \cdot \frac{0,87 \text{ kg Al}}{1 \text{ kg P}} \cdot \frac{L \text{ tečne stipse}}{0,466 \text{ kg}} \\ &= 28 L \text{ tečne stipse/kg P/L} \end{aligned}$$

Određivanje količine rastvora stipse na dan:

$$\text{stipsa} = \frac{12000 \frac{m^3}{d} \cdot 8 \frac{g}{m^3} \cdot 28 \frac{L \text{ stipse}}{kg P}}{1000 \frac{g}{kg}} = 2688 \frac{L \text{ stipse}}{d}$$

Određivanje potrebnih kapaciteta za skladištenje potrebnih količina stipse zasnovanih na prosečnom protoku:

$$\begin{aligned} \text{Kapaciteti za skladištenje} &= 2688 \frac{L}{d} \cdot 30d = 80640 L \\ &= 80,6 m^3 \end{aligned}$$

Zadatak 3. Procenite masu i zapreminu mulja proizvedenog u primarnom sedimentacionom bazenu u procesu precipitacije fosfora uz dodavanje kreča, ako se uzme u obzir pretpostavka da se 60% TSS uklanja bez dodavanja kreča, a da se dodavanjem 400 mg/L Ca(OH)₂ ukloni 85% TSS.

Ulazni podaci su:

- Protok otpadne vode m^3/d	1000
- TSS u otpadnoj vodi mg/L	220
- Isparljive TSS u otpadnoj vodi mg/L	150
- PO_4^{3-} u otpadnoj vodi kao P, mg/L	10

- Ukupna tvrdoća otpadne vode kao $CaCO_3$, mg/L 241,3
 - Ca^{2+} u otpadnoj vodi, mg/L 80
 - Mg^{2+} u otpadnoj vodi, mg/L 10
 - PO_4^{3-} u efluentu kao P, mg/L 0,5
 - Ca^{2+} u efluentu, $\frac{mg}{L}$ 60
 - Mg^{2+} u efluentu, mg/L 0
- Karakteristike mulja:
- specifična težina 1,07
 - sadržaj vlage, % 92,5

Rešenje:

Izračunati masu i zapreminu čvrste materije ukionjene bez hemikalija, uz pretpostavku da mulj sadrži 94% vlage i ima specifičnu težinu 1,03.

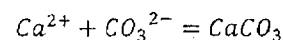
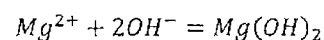
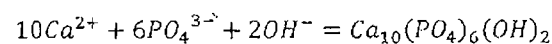
Određivanje mase uklonjenih TSS:

$$M_{TSS} = 0,6 \cdot 220 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^3} \cdot 1000 \frac{m^3}{d} = 132 \frac{kg}{d}$$

Određivanje zapremine proizvedenog mulja:

$$V_s = \frac{132 \frac{kg}{d}}{1,03 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,06} = 2,14 \frac{m^3}{d}$$

Primenom jednačina,



određuje se masa $Ca_5(PO_4)_3OH$, $Mg(OH)_2$ i $CaCO_3$ nastalih nakon dodavanja 400 mg/L kreča.

Određivanje mase nastalog $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$

$$\begin{aligned} \text{mol uklonjenog P} &= \frac{(10 - 0,5) \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{30,97 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 10^3 \frac{\text{mg}}{\text{g}}} \\ &= 0,307 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mol nastalog } \text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} &= \frac{1}{3} \cdot 0,307 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \\ &= 0,102 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{masa nastalog } \text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} &= 0,102 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 502 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 10^3 \frac{\text{mg}}{\text{g}} \\ &= 51,3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \end{aligned}$$

Određivanje mase nastalog $\text{Mg}(\text{OH})_2$

$$\text{mol Mg}^{2+} = \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{24,31 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 10^3 \frac{\text{mg}}{\text{g}}} = 0,411 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} \text{masa } \text{Mg}(\text{OH})_2 &= 0,411 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 58,3 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 10^3 \frac{\text{mg}}{\text{g}} \\ &= 24,0 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \end{aligned}$$

Određivanje mase nastalog CaCO_3

$$\begin{aligned} \text{masa } \text{Ca}^{2+} \text{ u } \text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} &= 5 \cdot 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0,102 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 10^3 \frac{\text{mg}}{\text{g}} \\ &= 20,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\text{masa } \text{Ca}^{2+} \text{ u } \text{Ca}(\text{OH})_2 = \frac{40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 400 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{74 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 216 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Određivanje mase Ca prisutnog kao CaCO_3

$$\begin{aligned}
 \text{konc. Ca}^{2+} \text{ u CaCO}_3 & \\
 &= \text{konc. Ca}^{2+} \text{ u influentu} \\
 &+ \text{konc. Ca}^{2+} \text{ u Ca(OH)}_2 \\
 &- \text{konc. Ca}^{2+} \text{ u Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} \\
 &- \text{konc. Ca}^{2+} \text{ u efluentu}
 \end{aligned}$$

$$\text{konc. Ca}^{2+} \text{ u CaCO}_3 = 80 + 216,2 - 20,4 - 60 = 215,8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Određivanje mase CaCO₃

$$\text{masa CaCO}_3 = \frac{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 215 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 540 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

1) Određivanje ukupne mase uklonjene čvrste materije kao rezultat dodavanja kreča.

Količina TSS u otpadnoj vodi iznosi:

$$M_{TSS} = \frac{0,85 \cdot 220 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 187 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Mase istaloženih jedinjenja po danu:

$$M_{\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}} = \frac{51,2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 51,2 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$M_{\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}} = \frac{24 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 24 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$M_{\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}} = \frac{540 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 540 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Ukupna masa uklonjenih jedinjenja:

$$M_{\text{uk}} = 187 + 51,2 + 24 + 540 = 802,3 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Određivanje ukupne zapremine mulja nastalog iz hemijske precipitacije, uz pretpostavku da mulj ima specifičnu težinu 1,07 i sadržaj vlage 92,5%.

$$V_s = \frac{802,3 \frac{kg}{d}}{1,07 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,075} = 10 \frac{m^3}{d}$$

Tabelom su date vrednosti masa i zapremina mulja izdvojenog sa i bez hemijske precipitacije

Tretman	Mulj	
	masa, kg/d	zapremina, m^3/d
bez hemijske precipitacije	132,0	2,14
sa hemijskom precipitacijom	802,3	10,0

iz tabele se može zaključiti da se hemijskom precipitacijom izdvaja velika količina mulja za razliku od količine mulja izdvojene biološkim procesom uklanjanja fosfora, što uzrokuje probleme daljeg tretmana otpadnog mulja.

Zadatak 4. Izračunati koncentraciju aluminijum-sulfata pri pH vrednosti 10. Pretpostaviti da voda sadrži 140 mg/L rastvorenih materija.

Rešenje:

$$[sp_{PO_4Al}] = \frac{K_{sp,AlPO_4} K_w^3}{\gamma_{PO_4} K_{sp,Al(OH)_3} \gamma_H^3 [H^+]^3} + \frac{K_{sp,AlPO_4} K_w^3}{\gamma_{HPO_4} K_{HPO_4} K_{sp,Al(OH)_3} \gamma_H^2 [H^+]^2} + \frac{K_{sp,AlPO_4} K_w^3}{\gamma_{H_2PO_4} K_{H_2PO_4} K_{HPO_4} K_{sp,Al(OH)_3} \gamma_H [H^+]} + \frac{K_{sp,AlPO_4} K_w^3}{K_{H_3PO_4} K_{H_2PO_4} K_{HPO_4} K_{sp,Al(OH)_3}}$$

$$K_{sp,AlPO_4} = 10^{-21} \quad \mu = 2,5 \cdot 10^{-5} TDS \quad \gamma = 10^{-\frac{0,5 z_i^2 (\sqrt{\mu})}{1+(\sqrt{\mu})}}$$

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 140 = 3,5 \cdot 10^{-3}$$

$$\gamma_{PO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 3^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,56$$

$$K_{sp, Al(OH)_3} = 10^{-33}$$

$$\gamma_H = \gamma_{H_2PO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 1^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,94$$

$$\gamma_{HPO_4} = 10^{-\frac{-0,5 \cdot 2^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,77$$

$$K_{HPO_4} = 10^{-12,3}$$

$$K_{H_2PO_4} = 10^{-7,2}$$

$$K_{H_3PO_4} =$$

$$\begin{aligned} [sp_{PO_4 Al}] &= \frac{(10^{-21})(10^{-14})^3}{(0,56)(10^{-33})(0,94)^3 [10^{-10}]^3} \\ &\quad + \frac{(10^{-21})(10^{-14})^3}{(0,77)(10^{-12,3})(10^{-33})(0,94)^2 [10^{-10}]^2} \\ &\quad + \frac{(10^{-21})(10^{-14})^3}{(0,94)(10^{-7,2})(10^{-12,3})(10^{-33})(0,94)[10^{-10}]} \\ &\quad + \frac{(10^{-21})(10^{-14})^3}{(10^{-2,1})(10^{-7,2})(10^{-12,3})(10^{-33})} \\ &= \frac{1,0(10^{-63})}{4,65(10^{-64})} + \frac{1,0(10^{-63})}{3,41(10^{-66})} + \frac{1,0(10^{-63})}{2,79(10^{-63})} + \frac{1,0(10^{-63})}{2,51(10^{-55})} \\ &= 295,76 \frac{gmol}{L} = 9,17 \times 10^6 \frac{mg}{L} \text{ fosfora} \end{aligned}$$

Dobijena vrednost od $9,17 \times 10^6 \frac{mg}{L}$ ukazuje na činjenicu da se fosfor ne može ukloniti u alkalnim uslovima.

Zadatak 5. Izračunati koncentraciju kalcijum-fosfata, izraženog kao mg/L fosfora kada je pH jednako 8. Pretpostaviti da voda sadrži $140 mg/L$ rastvorenih materija i $[Ca^{2+}] = 130 mg/L$ kao $CaCO_3$.

Rešenje:

$$[SP_{PO_4, Ca}] = \frac{K_{sp,apatit}^{1/3} \gamma_H^{1/3} [H^+]^{1/3}}{\gamma_{Ca}^{1/3} [Ca^{2+}]^{5/3} K_w^{1/3} \gamma_{PO_4}} + \frac{K_{sp,apatit}^{1/3} \gamma_H^{4/3} [H^+]^{4/3}}{\gamma_{HPO_4} K_{HPO_4} \gamma_{Ca}^{1/3} [Ca^{2+}]^{5/3} K_w^{1/3}} + \frac{K_{sp,apatit}^{1/3} \gamma_H^{7/3} [H^+]^{7/3}}{\gamma_{H_2PO_4} K_{H_2PO_4} K_{HPO_4} \gamma_{Ca}^{1/3} [Ca^{2+}]^{5/3} K_w^{1/3}} + \frac{K_{sp,apatit}^{1/3} \gamma_H^{10/3} [H^+]^{10/3}}{K_{H_3PO_4} K_{H_2PO_4} K_{HPO_4} \gamma_{Ca}^{1/3} [Ca^{2+}]^{5/3} K_w^{1/3}}$$

$$K_{sp,apatit} = 10^{-55,9} \quad \gamma_H = \gamma_{H_2PO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 2^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,94$$

$$\gamma_{Ca} = \gamma_{HPO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 2^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,77$$

$$[Ca^{2+}] = \frac{130}{1000(40,1)} = 3,24(10^{-3}) \text{ g mol/L}$$

$$\gamma_{PO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 3^2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}}} = 0,56$$

$$K_{HPO_4} = 10^{-12,3} \quad K_{H_2PO_4} = 10^{-7,2} \quad K_{H_3PO_4} = 10^{-2,1}$$

Dobija se,

$$[SP_{PO_4, Al}] = \frac{(10^{-55,9})^{1/3} (0,94)^{1/3} [10^{-8}]^{1/3}}{(0,77)^{1/3} [3,24(10^{-3})]^{5/3} (10^{-14})^{1/3} (0,56)} + \frac{(10^{-55,9})^{1/3} (0,94)^{4/3} [10^{-8}]^{4/3}}{(0,77)(10^{-12,3})(0,77)^{1/3} [3,24(10^{-3})]^{5/3} (10^{-14})^{1/3}} + \frac{(10^{-55,9})^{1/3} (0,94)^{7/3} [10^{-8}]^{7/3}}{(0,94)(10^{-7,2})(10^{-12,3})(0,77)^{1/3} [3,24(10^{-3})]^{5/3} (10^{-14})^{1/3}} + \frac{(10^{-55,9})^{1/3} (0,94)^{10/3} [10^{-8}]^{10/3}}{(10^{-2,1})(10^{-7,2})(10^{-12,3})(0,77)^{1/3} [3,24(10^{-3})]^{5/3} (10^{-14})^{1/3}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{4,91(10^{-22})}{7,85(10^{-10})} + \frac{4,62(10^{-30})}{5,41(10^{-22})} + \frac{4,34(10^{-38})}{4,16(10^{-29})} + \frac{4,08(10^{-46})}{3,52(10^{-31})} \\
&= 6,25(10^{-13}) + 8,54(10^{-9}) + 1,04(10^{-9}) + 1,16(10^{-15}) \\
&= 9,58(10^{-9}) \text{ gmol/L} \\
&= 2,97 \times 10^{-4} \text{ mg/L}
\end{aligned}$$

Efikasno uklanjanje fosfora se postiže u kiselim uslovima pomoću stipse.

Zadatak 6. Izračunati koncentraciju gvožđe-fosfata i izraziti koncentraciju fosfora u mg/L , kada je pH jednako 8. Pretpostaviti da voda sadrži 140 mg/L rastvorenih materija.

Rešenje:

$$\begin{aligned}
[s_{PO_4FeIII}] &= \frac{K_{sp,FePO_4}K_w^3}{\gamma_{PO_4}K_{sp,Fe(OH)_3}\gamma_H^3[H^+]^3} \\
&+ \frac{K_{sp,FePO_4}K_w^3}{\gamma_{HPO_4}K_{HPO_4}K_{sp,Fe(OH)_3}\gamma_H^2[H^+]^2} \\
&+ \frac{K_{sp,FePO_4}K_w^3}{\gamma_{H_2PO_4}K_{H_2PO_4}K_{HPO_4}K_{sp,Fe(OH)_3}\gamma_H[H^+]} \\
&+ \frac{K_{sp,FePO_4}K_w^3}{K_{H_3PO_4}K_{H_2PO_4}K_{HPO_4}K_{sp,Fe(OH)_3}}
\end{aligned}$$

$$K_{sp,FePO_4} = 10^{-21,9}$$

$$\gamma_{PO_4} = 10^{-\frac{-0,5 \cdot 3^2[\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}{1 + [\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}} = 0,56$$

$$K_{sp,Fe(OH)_3} = 1,1(10^{-36})$$

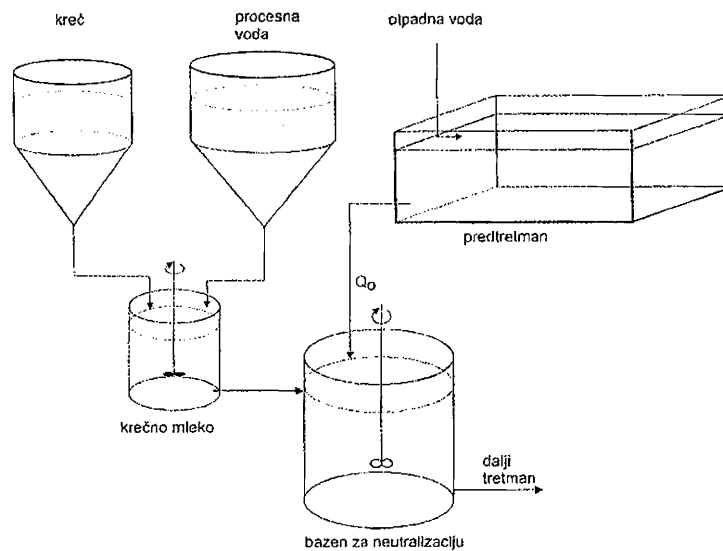
$$\gamma_H = \gamma_{H_2PO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 1^2[\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}{1 + [\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}} = 0,94$$

$$\gamma_{HPO_4} = 10^{-\frac{0,5 \cdot 2^2[\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}{1 + [\sqrt{3,5 \cdot 10^{-3}}]}} = 0,77$$

$$\begin{aligned}
K_{HPO_4} &= 10^{-12,3} & K_{H_2PO_4} &= 10^{-7,2} & K_{H_3PO_4} &= 10^{-2,1} \\
[sp_{PO_4FeIII}] &= \frac{(10^{-21,9})(10^{-14})^3}{(0,56)(1,1)(10^{-36})(0,94)^3[10^{-8}]^3} \\
&+ \frac{(10^{-21,9})(10^{-14})^3}{(0,77)(10^{-12,3})(1,1)(10^{-36})(0,94)^2[10^{-8}]^2} \\
&+ \frac{(10^{-21,9})(10^{-14})^3}{(0,94)(10^{-7,2})(10^{-12,3})(1,1)(10^{-36})(0,94)[10^{-8}]} \\
&+ \frac{(10^{-21,9})(10^{-14})^3}{(10^{-2,1})(10^{-7,2})(10^{-12,3})(1,1)(10^{-36})} \\
&= \frac{1,26(10^{-64})}{5,12(10^{-61})} + \frac{1,26(10^{-64})}{3,75(10^{-65})} + \frac{1,26(10^{-64})}{3,07(10^{-64})} + \frac{1,26(10^{-64})}{2,76(10^{-58})} \\
&= 2,46(10^{-4}) + 3,36 + 0,41 + 4,57(10^{-7}) = 3,77 \text{ gmol/L} \\
&= 1,17 \times 10^5 \text{ mg/L}
\end{aligned}$$

Podlašavanje pH vrednosti

Zadatak 1. Projektovati bazen za neutralizaciju sa vremenom zadržavanja od 20 minuta, kao i kompletan sistem za neutralizaciju industrijske otpadne vode, predstavljen na šemi. Otpadna voda ima sledeće karakteristike: protok $124 \text{ m}^3/\text{h}$, pH 3,5, aciditet u obliku CaCO_3 605 mg/L , sulfati 1300 mg/L , suspendovane materije 65 mg/L .



Rešenje:

Neutralizacioni bazen:

Vreme zadržavanja je 20 minuta, a pretpostavlja se da je dubina vode u bazenu za neutralizaciju 1,52 m, pa se dobija da je:

$$\begin{aligned} \text{Zahtevana zapremina} &= 124 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{60 \text{min}} \cdot 20 \text{min} \\ &= 41,3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Zahtevana površina} = \frac{41,3 \text{ m}^3}{1,52 \text{ m}} = 27,2 \text{ m}^2$$

Bazen za neutralizaciju može biti pravougaonog, kvadratnog ili kružnog poprečnog preseka. Kod kvadratnog bazena svaka stranica je 5,2 m.

Teoretska potrebna količina kreča:

Količina potrebnog kreča biće izračunata na osnovu aciditeta prisutnog u vodi. Pretpostavljajući da je efikasnost kreča 70 %, dobija se i potrebna količina:

$$\begin{aligned} \text{Teoretska dnevna potrebna količina kreča} \\ &= 605 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \frac{1 \text{ mol Ca(OH)}_2}{1,35 \text{ mol CaCO}_3} \cdot \frac{1}{0,7} \\ &= 640 \frac{\text{mg Ca(OH)}_2}{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{U jedinicama } \frac{\text{kg}}{\text{d}} \text{ potrebna količina je} \\ &= 640 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \cdot 124 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{10^{-6} \text{kg}}{\text{mg}} \cdot \frac{\text{l}}{10^{-3} \text{m}^3} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{d}} \\ &= 1904,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Stavna potrebna količina kreča se dobija eksperimentalno, titracijom. U realnim uslovima potrebne količine kreča su veće od teoretskih zbog ostalih prisutnih hemikalija. U ovom konkretnom primeru, na teoretsku vrednost se dodaje 15% da bi se dobila stvarna vrednost potrebnog kreča koja tada iznosi:

$$\begin{aligned} \text{Stvarna potrebna količina kreča} &= 1904,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 1,15 \\ &= 2190,3 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Najčešći oblici kreča koji se koriste u industriji su kalcijum oksid, hidratizirani kreč i krečnjak. Najširu primenu ima kalcijum oksid, pa će u ovom primeru on biti korišćen:

$$\begin{aligned} \text{Zahtevana količina kalcijum oksida} \\ &= 2190,3 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \frac{56 \text{ g negašenog kreča}}{74 \text{ g hidratiziranog kreča}} \\ &= 1657,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Stvarna zahtevana količina kalcijum oksida zavisice od efikasnosti postupka gašenja kreča. Pretpostavice se da je efikasnost gašenja kreča 90% pa se dobija da je:

$$\begin{aligned} \text{Stvarna potrebna količina CaO} &= 1657,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \frac{1}{0,9} \\ &= 1841,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Određivanje zapremine silosa za kreč:

Potreban kapacitet silosa je da skladišti kreč 7 dana, što znači da je potrebno da skladišti masu od:

$$\text{Kapacitet silosa} = 1841,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 7 \text{d} = 12891,9 \text{ kg}$$

Uzimajući gustinu kreča od 481 kg/m^3 dobija se potrebna zapremina silosa koja iznosi:

$$\text{Potrebna zapremina silosa} = \frac{12891,9 \text{ kg}}{481 \text{ kg/m}^3} = 26,8 \text{ m}^3$$

Napajanje „krečnim mlekom“

$$\text{Časovni protok kreča} = 1841,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \text{ h}} = 76,7 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

U praksi se zahteva 10 – 15% krečne kaše, a uzeće se u ovom slučaju 15%. Da bi se izračunala zapremina krečnog mleka i potrebne količine vode, neophodno je da se laboratorijski odredi specifična težina krečnog mleka. Specifična težina mulja je 1,05, a gustina 1055 kg/m^3 od koje 15% predstavlja kreč.

Dobija se da je protok krečnog mleka:

$$\begin{aligned} \text{Protok krečnog mleka} &= 76,7 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{1055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \text{ kg krečne kaše}}{0,15 \text{ kg CaO}} \\ &= 0,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

Ukoliko je vreme zadržavanja 30 min zahtevana zapremina rezervoara za pripremu krečnog mleka je:

$$\text{Zapremina} = 0,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,24 \text{ m}^3$$

Ukoliko se koristi rezervoar cilindričnog oblika kod koga su prečnik i visina jednaki, dobija se $D = H = 0,67 \text{ m}$

Rezervoar za mešanje

Ukoliko se usvoji da je vreme zadržavanja 3 min, onda je:

$$\text{Zapremina} = \frac{3}{60} \text{ h} \cdot \left[124 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 0,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = 6,2 \text{ m}^3$$

Ako je rezervoar za mešanje cilindričnog oblika kod koga su prečnik i visina jednaki, dobija se da je, $D = H = 2 \text{ m}$.

Zadatak 2. Proceniti potencijal formiranja slojeva kamenca na 20°C korišćenjem *LSI* i *RI* indeksa za tretiranu otpadnu vodu koja ima sledeće hemijske karakteristike:

Konstituent	Koncentracija	
	g/m^3	mol/L
Ca^{2+}	5	$0,125 \cdot 10^{-3}$
HCO_3^-	10	$0,164 \cdot 10^{-3}$
<i>TDS</i>	20	
<i>pH</i>	7,7	

Rešenje:

1. Prvo se određuje jonska jačina tretirane vode korišćenjem jednačine $I = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot \text{TDS}$

$$I = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 20 = 50 \cdot 10^{-5}$$

2. Potom se izračunava koeficijent aktivnosti za kalcijum i bikarbonate korišćenjem jednačine:

Za kalcijum

$$\log \gamma_{\text{Ca}^{2+}} = -\frac{0,5Z_i^2\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} = -\frac{0,52^2\sqrt{50 \cdot 10^{-5}}}{1 + \sqrt{50 \cdot 10^{-5}}} = -0,0437$$

$$\gamma_{Ca^{2+}} = 0,903$$

Za bikarbonate

$$\log \gamma_{HCO_3^-} = -\frac{0,51^2 \sqrt{50 \cdot 10^{-5}}}{1 + \sqrt{50 \cdot 10^{-5}}} = -0,0109$$

$$\gamma_{HCO_3^-} = 0,975$$

3. Određivanje pH vrednosti pri zasićenju, pH_s , izračunava se pomoću jednačine:

$$pH_s = -\log \frac{\{K_{a2} \cdot \gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]\}}{K_{sp}}$$

$$pH_s = -\log \frac{4,169 \cdot 10^{-11} \cdot 0,903 \cdot 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot 0,975 \cdot 0,164 \cdot 10^{-3}}{5,25 \cdot 10^{-9}}$$

$$pH_s = -\log(1,43 \cdot 10^{-10}) = 9,84$$

Određivanje indeksa LSI i RI vrši se korišćenjem jednačina:

a. Langelierov indeks, LSI

$$LSI = pH - pH_s = 7,7 - 9,84 = -2,14$$

Oдавде se vidi da je $LSI < 0$, što znači da je voda nezasićena sa kalcijum karbonatom, pa neće dolaziti do stvaranja kamenca na zidovima bazena ali će imati tendenciju skidanja postojećeg zaštitnog sloja kamenca u cevima i opremi.

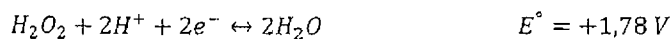
b. Riznerov indeks, RI

$$RI = 2 \cdot pH_s - pH = 2 \cdot 9,84 - 7,7 = 11,98$$

Na osnovu vrednosti da je $RI > 8,5$, može se konstatovati da je voda hemijski vrlo agresivna.

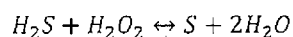
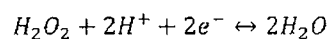
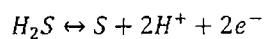
Oksidacija

Zadatak 1. Potrebno je odrediti da li H_2S može biti oksidovan pomoću H_2O_2 . Odgovarajuće polureakcije iz tabele 3.8 i 3.7 su:



Rešenje:

- 1) Prvo je potrebno odrediti ukupnu reakciju koju čine dve navedene polureakcije:



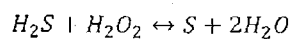
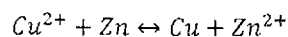
- 2) Potom se utvrđuje $E^\circ_{reakcije}$, za sumarnu reakciju:

$$E^\circ_{reakcije} = E^\circ_{H_2O_2/2H^+/2H_2O} - E^\circ_{S^{2-}/S}$$

$$E^\circ_{reakcije} = 1,78 V - (-0,14 V) = +1,92 V$$

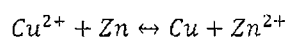
Kako je $E^\circ_{reakcije}$ pozitivno, reakcija se odvija u smeru kako je i napisana.

Zadatak 2. Odrediti ravnotežnu konstantu za sledeće oksido-redukционе reakcije:



Rešenje:

- 1) Utvrđuje se konstanta ravnoteže za sledeću reakciju:



Izračunavanje $E^\circ_{\text{reakcije}}$:

$$E^\circ_{\text{reakcije}} = E^\circ_{\text{redukcije}} - E^\circ_{\text{oksidacije}}$$

$$E^\circ_{\text{reakcije}} = E^\circ_{\frac{\text{Cu}^{2+}}{\text{Cu}}} - E^\circ_{\frac{\text{Zn}^{2+}}{\text{Zn}}}$$

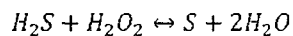
$$E^\circ_{\text{reakcije}} = 0,34 \text{ V} - (-0,763 \text{ V}) = 1,103 \text{ V}$$

Kao što je izračunato $E^\circ_{\text{reakcije}}$ je $+1,1 \text{ V}$, a 2 je broj elektrona koji se razmenjuju. Korišćenjem ovih podataka, vrednost K se određuje kao što sledi:

$$\log K = \frac{nE^\circ_{\text{reakcije}}}{0,0592} = \frac{2 \cdot 1,1}{0,0569} = 37,2$$

$$K = 1,58 \cdot 10^{37} = \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

2) Određivanje konstante ravnoteže za sledeću reakciju:



Iz prethodnog zadatka $E^\circ_{\text{reakcije}}$ je $1,92 \text{ V}$, a vrednost K je :

$$\log K = \frac{nE^\circ_{\text{reakcije}}}{0,0592} = \frac{2 \cdot 1,92}{0,0569} = 64,9$$

$$K = 7,94 \cdot 10^{64} = \frac{[\text{S}]}{[\text{H}_2\text{S}][\text{H}_2\text{O}_2]}$$

Zadatak 3. Radi regulisanja koncentracije azotnih jedinjenja u otpadnoj vodi, vrši se hlorisanje preko prelomne tačke. Protok otpadne vode je $3800 \text{ m}^3/\text{d}$, sadržaj biodegradabilnih organskih materija je 20 g/m^3 , sadržaj suspendovanih čestica je 25 g/m^3 , a koncentracija amonijačnog azota je 23 g/m^3 . Potrebno je izračunati količinu hlora koja se koristi u ovom procesu, ako je zahtevana izlazna koncentracija amonijačnog azota 1 g/m^3 .

Rešenje:

- 1) Na osnovu stehiometrije i određenog stepena sigurnosti, pretpostavi se da je potreban maseni odnos hlora i amonijaka, 9:1. Sada se za ukupnu količinu amonijačnog azota, koja se sa vrednosti 23 uklanja do 1 g/m^3 , u otpadnoj vodi, izračunava potrebna količina hlora:

$$\frac{\text{kg Cl}_2}{\text{d}} = \frac{\left[3800 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot (23 - 1) \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 9,0 \right]}{10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 752,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

- 2) Određivanje porasta ukupnih rastvorenih čestica dodatih otpadnoj vodi se radi na osnovu podataka datih u sledećoj tabeli.

Tabela 6.1. Povećanje ukupno rastvorenih čvrstih materija po jediničnoj potrošnji amonijum jona u zavisnosti od korišćenog oksidacionog sredstva

Hemikalija koja se koristi za oksidaciju preko prelomne tačke	Povećanje ukupno rastvorenih čvrstih materija po jediničnoj potrošnji amonijum jona, NH_4^+
Gasni hlor	6,2: 1
Natrijum hipohlorit	7,1: 1
Gasni hlor i neutralizacija kiselosti sa krečom	12,2: 1
Gasni hlor i neutralizacija sa natrijum hidroksidom	14,8: 1

Pri korišćenju gasnog hlora, povećanje ukupnih rastvornih materija u mg po litru potrošenog amonijaka iznosi 6,2 i na osnovu bilansa se dobija:

$$\begin{aligned} \text{Porast ukupnih rastvorenih materija} &= 6,2 \cdot (23 - 1) \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ &= 136 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Adsorpcija

Zadatak 1. Otpadna voda koja sadrži $[C_0] = 25 \text{ mg/L}$ fenola se tretira sa *PAK* da bi koncentracija fenola u efluentu iznosila $[C]_{eff} = 0,1 \text{ mg/L}$. *PAK* se dodaje u struju vode iz koje se izdvaja taloženjem u narednoj operaciji. Konstante Lengmirove izoterme su određene džar-testom.

Ukoliko je protok otpadne vode koja se tretira $Q_0 = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, izračunati količinu *PAK* koja je potrebna za ovu operaciju uklanjanja fenola do krajnje rezidualne koncentracije.

Test	Količina dodatog <i>PAK</i> , $M \text{ (g)}$	$[C] \text{ (mg/L)}$
1	0,25	6,0
2	0,32	1,0
3	0,5	0,25
4	1,0	0,09
5	1,5	0,06
6	2,0	0,06
7	2,6	0,06

Rešenje:

Izračunavanje Lengmirovih konstanti, a i b , se vrši primenom jednačina:

$$a = \frac{\left\{ l \sum_{i+1}^m [C] - (m-l) \sum_1^l [C] \right\}}{\left\{ l \sum_{i+1}^m \frac{[C]}{X/M} - (m-l) \sum_1^l \frac{[C]}{X/M} \right\}}$$
$$b = \frac{l}{a \sum_1^l \frac{[C]}{X/M} - \sum_1^l [C]}$$

Testovi 6 i 7 se zanemaruju zbog toga što dobijene ponovljene vrednosti (0,06) govore da više nije bilo adsorpcije.

Test	Količina dodatog PAK-a, M (g)	[C] (mg/l)	X/M	[C]/ $\frac{X}{M}$
1	0,25	6,0	0,076	78,95
2	0,32	1,0	0,075	13,33
3	0,5	0,25	0,0495	5,05
4	1,0	0,09	0,0249	3,61
5	1,5	0,06	0,0166	3,61

Broj parova eksperimentalnih podataka je $m = 5$ i neka je $l = 3$:

$$a = \frac{3(0,09 + 0,06) - 2(6,0 + 1,0 + 0,25)}{3(3,61 + 3,61) - 2(78,95 + 13,33 + 5,05)} = \frac{0,45 - 14,5}{21,66 - 194,66} = 0,081$$

$$b = \frac{3}{0,081(78,95 + 13,33 + 5,05) - (6,0 + 1,0 + 0,25)} = \frac{3}{7,88 - 7,25} = 4,76$$

Primenom jednačine Lengmirove izoterme, dobija se adsorpcioni kapacitet PAK:

$$\frac{X}{M} = \frac{ab[C]}{1 + b[C]} = \frac{0,08 \cdot 4,76 \cdot 0,10}{1 + 4,76 \cdot 0,10} = 0,026 \frac{\text{količina fenola koja se uklanja, kg}}{\text{kg C}}$$

Količina fenola koja treba da se ukloni iznosi:

$$0,11 \cdot (0,025 - 0,0001) = 0,00274 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Pa se dobija da je potrebna količina PAK:

$$PAK = \frac{0,00274}{0,026} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 = 9105 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Maksimalni adsorpcioni kapacitet je:

$$\left(\frac{X}{M}\right)_{ult} = a = 0,081 \frac{\text{kg uklonjenog fenola}}{\text{kg C}}$$

Najniža koncentracije fenola je $0,06 \text{ mg/L}$, $[C] = 0,06 \text{ kg/L}$, u tom slučaju:

$$\frac{X}{M} = \frac{0,081 \cdot 4,76 \cdot 0,06}{1 + 4,76 \cdot 0,06} = 0,018 \frac{\text{kg fenola}}{\text{kg C}}$$

Ukupna količina fenola koju je potrebno ukloniti do krajnje rezidualne koncentracije iznosi:

$$0,11 \cdot (0,025 - 0,00006) = 0,00274 \text{ kg/s}$$

Potrebna količina PAK za uklanjanje prethodno izračunate količine fenola je:

$$PAK = \frac{0,00274}{0,018} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 = 13152 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Zadatak 2. Rešavanje prethodnog primera korišćenjem Frojndlihove izoterme.

Rešenje:

Izračunavanje Frojndlihovih koeficijenata:

$$n = \frac{l \sum_{i=1}^m \ln[C] - (m-l) \sum_1^l \ln[C]}{l \left(\sum_{i=1}^m \ln \frac{X}{M} - (m-l) \sum_1^l \ln \frac{X}{M} \right)}$$

$$k = \exp \left(\frac{\sum_1^l \ln \frac{X}{M} - \frac{1}{n} \sum_1^l \ln[C]}{l} \right)$$

Testovi 6 i 7 se zanemaruju iz istih razloga kao i u prethodnom zadatku.

Test	Količina dodatog PAK, M (g)	[C] (mg/L)	ln[C]	X/M	ln X/M
1	0,25	6,0	1,79	0,076 *	- 2,58
2	0,32	1,0	0	0,075	- 2,59
3	0,5	0,25	- 1,39	0,049	- 3,02
4	1,0	0,09	- 2,41	0,025	- 3,69
5	1,5	0,06	- 2,81	0,017	- 4,07

* 0,076 = (25-6)(1)/0,25(1000), ostale vrednosti su slično izračunate

$$l = 3, m = 5$$

$$n = \frac{3(0,09 + 0,06) - 2(6,0 + 1,0 + 0,25)}{3(-3,69 - 4,07) - 2(-2,58 - 2,59 - 3,02)} = \frac{0,45 - 14,5}{-23,28 + 16,38} = 2,04$$

$$k = \exp \left[\frac{(-2,58 - 2,59 - 3,02) - \frac{1}{2,04}(1,79 + 0 - 1,39)}{3} \right]$$

$$= \exp \left[\frac{-8,19 - 0,196}{3} \right]$$

$$= 0,061$$

Dobija se da je adsorpcioni kapacitet:

$$\frac{X}{M} = k[C]^{1/n} = 0,061(0,1)^{1/2,04}$$

$$= 0,020 \frac{\text{kg fenola koji se uklanja}}{\text{kg C}}$$

Ukupna količina fenola koja treba da se ukloni:

$$0,11 \cdot (0,025 - 0,0001) = 0,00274 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Pa je potrebna količina PAK:

$$PAK = \frac{0,00274}{0,020} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 = 11837 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Iz jednačine $\frac{X}{M} = k[C]^{1/n}$, se vidi da kako $[C]$ raste i odnos X/M raste, teoretski to znači da X/M može da postane beskonačno. Praktično, to znači da ravnotežna koncentracija C mora biti određena eksperimentalno. Podaci ne pokazuju ovo, pa zbog toga za određivanje adsorpcionog kapaciteta mora biti korišćena Lengmirova izoterma.

Pa je:

$$\left(\frac{X}{M}\right)_{ult} = a = 0,081 \frac{\text{kg uklonjenog fenola}}{\text{kg } C}$$

Najniža koncentracije fenola je $0,06 \text{ mg/l}$, $[C] = 0,06 \text{ kg/l}$, u tom slučaju je:

$$\frac{X}{M} = 0,061 (0,06)^{1/2,04} = 0,015 \frac{\text{kg fenola}}{\text{kg } C}$$

Ukupna količina fenola koju treba ukloniti do krajnje rezidualne koncentracije iznosi:

$$0,11 \cdot (0,025 - 0,00006) = 0,00274 \text{ kg/s}$$

Pa je zahtevana količina PAK-a:

$$PAK = \frac{0,00274}{0,015} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 = 15782 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Zadatak 3. Eksperimentalni podaci uklanjanja fenola su prikazani u tabeli. Odrediti dužinu aktivne zone δ . Prečnik kolone koja se koristi je $2,54 \text{ cm}$, a gustina pakovanog sloja je $721,58 \text{ kg/m}^3$. $[C_0]$ je jednako 25 mg/L , a $X/M = 0,020 \text{ kg/kg}$.

$C \text{ (mg/L)}$	$V \text{ (L)}$
0,06	1,0
1,0	1,24
6,0	1,31
10	1,43
15	1,48
18	1,58
20	1,72
23	1,83
25	2,00

Rešenje:

Debljina aktivne zone se računa primenom jednačine:

C (mg/L)	V (L)	$\frac{(V_{n+1} - V_n)}{1000}$, (m^3)	$\frac{[C_{n+1}] + [C_n]}{2(1000)}$, ($\frac{kg}{m^3}$)	$\frac{(V_{n+1} - V_n)}{1000} \cdot \frac{([C_{n+1}] + [C_n])}{2(1000)}$, (kg)
0,06	1,0	-	-	-
1,0	1,24	0,00024	0,00053	0,00000013
6,0	1,31	0,00007	0,0035	0,00000025
10	1,43	0,00012	0,008	0,00000096
15	1,48	0,00005	0,0125	0,00000063
18	1,58	0,0001	0,0165	0,0000017
20	1,72	0,00014	0,019	0,0000027
23	1,83	0,00011	0,0215	0,0000024
25	2,00	0,00017	0,024	0,0000041

$$\delta = \frac{2 \left\{ (V_x - V_b)[C_0] - \sum (V_{n+1} - V_n) \left(\frac{[C_{n+1}] + [C_n]}{2} \right) \right\}}{A_s \rho_p \left(\frac{K}{M} \right)_{ult}}$$

V_x zapremina vode koja je prošla kroz adsorpcionu kolonu do kritične koncentracije, m^3

V_b zapremina vode koja je prošla kroz adsorpcionu kolonu do tačke proboja, m^3

Potrebne vrednosti za rešavanje jednačine su izračunate i prikazane tabelom:

$$\sum = 0,0000128$$

Površina kolone je jednaka:

$$A_s = \frac{\pi [0,0254]^2}{4} = 0,00051 \text{ m}^2$$

Kada se ubace izračunate vrednosti u jednačinu, dobija se da je potrebna debljina aktivne zone δ :

$$\delta = \frac{2(0,002 - 0,001)(0,025) - 0,0000128}{0,00051 \cdot 721,58 \cdot 0,020} = 0,0051 \text{ m} \\ = 5,1 \text{ mm}$$

Zadatak 4. Laboratorijska adsorpciona kolona ispunjena GAK ima prečnik od 10,16 cm i visinu od 3,66 m. Protok vode kroz nju iznosi 0,0757 m³/h.

Izračunati:

- 1) površinsko opterećenje u m³/min·m²;
- 2) vreme zadržavanja t u koloni;
- 3) zapreminski protok Q kroz kolonu za izračunato vreme zadržavanja;
- 4) površinsko opterećenje koje bi dalo isto vreme zadržavanja u koloni koja bi imala prečnik 6,1 m i visinu 9,14 m.

Rešenje:

- 1) Izračunavanje površinskog opterećenja kolone:

$$\begin{aligned} \text{Površina kolone} &= \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{10,16^2 \pi}{4} = 81,07 \text{ cm}^2 \\ &= 0,00811 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Površinsko opterećenje} = \frac{Q}{A} = \frac{0,0757 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0,00811 \text{ m}^2} = 9,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

- 2) Izračunavanje vremena zadržavanja:

$$\text{Linearna brzina} = \frac{9,33 \text{ m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{\text{h}}{60 \text{ min}} = 0,155 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$t = \frac{3,66 \text{ m}}{0,155 \text{ m/min}} = 23,6 \text{ min}$$

- 3) Izračunavanje zapreminskog protoka, Q:

Udeo praznina kod kolona sa granularnim aktivnim ugljom se kreće od 0,40 do 0,55, a uzeće se srednja vrednost od 0,50.

$$Q = \frac{0,50}{t}$$

$$Q = \frac{0,50}{23,6} \cdot 60 = 1,27 \frac{\text{zapremina pakovanja}}{\text{h}}$$

- 4) Izračunavanje površinskog opterećenja za kolonu prečnika 6,1 m i visine 9,14 m, koja ima isto vreme zadržavanja kao i laboratorijska kolona:

$$\text{Zahtevana linearna brzina} = \frac{9,14 \text{ m}}{23,6 \text{ min}} = 0,387 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$\begin{aligned} \text{Površinsko opterećenje} &= 0,387 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \\ &= 23,22 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \end{aligned}$$

Zadatak 5. Za laboratorijska istraživanja korišćena je adsorpciona kolona sa aktivnim ugljem prečnika 2,54 cm. Otpadna voda sadrži 12 mg/L ABS sintetičkog deterdženta čija izlazna koncentracija treba, pomoću adsorpcione kolone, da se spusti na vrednost od 0,5 mg/L. Laboratorijski podaci uključujući visinu pakovanja, protoke, kao i vrednosti propuštene zapremine i vremena su u vezi sa probojnom koncentracijom od 0,5 mg/L. Odrediti vrednosti Bohart-Adams-ove konstante K i N_o , kao i vrednost x_o za svaku vrednost površinske brzine.

Površinska brzina ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)	Dubina pakovanja (m)	Propuštena zapremina (m^3)	Vreme (h)
6,11	0,914	3,104	1000
6,11	1,524	6,851	2215
6,11	2,134	10,560	3410
11,0	0,914	2,233	400
11,0	1,524	5,488	990
11,0	2,743	12,036	2160
19,56	1,522	4,334	440
19,56	2,743	10,503	1060
19,56	3,658	15,102	1525

Rešenje:

- 1) Bohart-Adamsova (Bohart, Adams) jednačina glasi:

$$t = \left(\frac{N_o}{C_o V} \right) X - \frac{1}{K C_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_b} - 1 \right)$$

- C_o početna koncentracija rastvora, kg/m^3
 C_b željena propuštena koncentracija rastvora, kg/m^3
 K konstanta, $\frac{m^3 \text{ tečnosti}}{kg \text{ uglja} \cdot h}$
 N_o kapacitet adsorpcije uglja, kg/m^3
 x visina nasutog sloja uglja u koloni, m
 V površinska brzina, $\frac{m}{h} \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$
 t radno vreme kolone pod navedenim uslovima, h

Jednačina $y = mx + b$ predstavlja pravu liniju. Zavisnost radnog vremena t i visine pakovanja predstavlja liniju sa nagibom m , $\left(\frac{N_o}{C_o V}\right)$, i odsečkom koji je jednak:

$$-\frac{1}{KC_o} \ln\left(\frac{C_o}{C_b} - 1\right)$$

Vrednosti K i N_o se mogu odrediti na osnovu grafika.

- 2) Na dijagramu su prikazani dobijeni podaci i određeni su nagib i odsečak za svaku liniju
- 3) Izračunavanje N_o korišćenjem nagiba linija:

$$\text{Nagib} = \frac{N_o}{C_o V}$$

C_o je početna koncentracija ABS rastvora, kg/m^3 a V je linearna brzina.

Dijagram za određivanje nagiba i odsečka Bohart-Adamsove jednačine.

Za $7,26 \text{ m}^3/h \cdot \text{m}^2$:

$$V = 6,11 \frac{\text{m}^3}{h \cdot \text{m}^2} = 6,11 \frac{\text{m}}{h}$$

$$C_o = \left(12 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{mg}}\right) \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}}\right) \left(\frac{\text{L}}{10^{-3} \text{m}^3}\right)$$

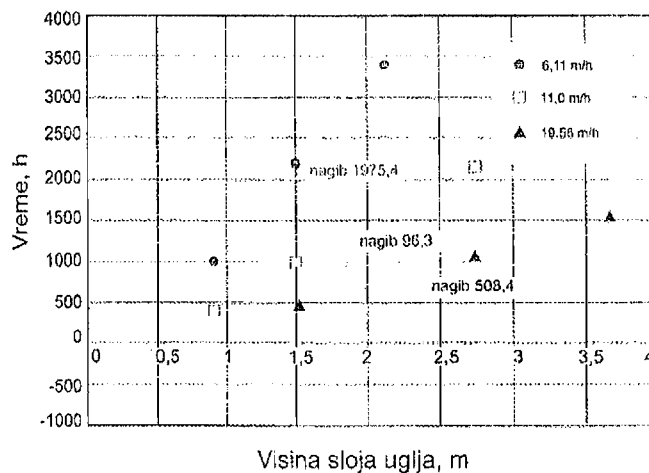
$$C_o = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Nagib = 1975,4 \frac{h}{m} = \frac{N_o}{C_o V}$$

$$N_o = 1975,4 \frac{h}{m} \cdot C_o \cdot V$$

$$N_o = 1975,4 \frac{h}{m} \cdot 0,012 \frac{kg}{m^3} \cdot 6,11 \frac{m}{h}$$

$$N_o = 144,8 \frac{kg}{m^3}$$



4) Izračunavanje K korišćenjem odsečka linije.

$$Odsečak = -\frac{1}{C_o K} \ln \left(\frac{C_o}{C_b} - 1 \right)$$

Za $7,26 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$:

$$Odsečak = -800h = -\frac{1}{0,012 \frac{kg}{m^3} \cdot K} \ln \left(\frac{12 \frac{mg}{L}}{0,5 \frac{mg}{L}} - 1 \right)$$

$$K = -\frac{1}{0,012 \frac{kg}{m^3} (-800h)} \ln(24 - 1)$$

$$K = 0,327 \frac{m^3}{kg \cdot h}$$

Na sličan način se izračunavaju i ostale vrednosti K .

5) Izračunavanje visine zone izmene, x_o , za svaku vrednost protoka.

$$x_o = \frac{V}{KN_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_b} - 1 \right)$$

Za $6,11 m^3/h \cdot m^2$:

$$x_o = \frac{6,11 m/h}{(0,327 \frac{m^3}{kg \cdot h}) (144,8 \frac{kg}{m^3})} \ln \left(\frac{12}{0,5} - 1 \right)$$

$$x_o = 0,405 m$$

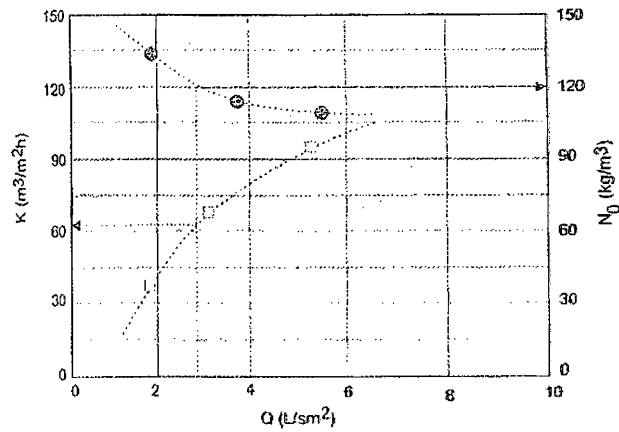
6) Konstante u Bohart-Adamsvoj jednačini su sumirane u tabeli:

Površinska brzina ($m^3/h \cdot m^2$)	Nagib (h/m)	Odsečak (h)	N_o (kg/m^3)	K $\frac{m^3}{kg \cdot h}$	x_o (m)
7,26	1977	-800	139	0,327	0,405
13,03	964	-488	127	0,534	0,505
23,29	508	-300	119	0,773	0,664

Zadatak 6. Korišćenjem podataka iz zadatka 5, projektovati adsorpcionu kolonu za tretiranje otpadne vode koja sadrži $12 mg/L$ ABS i ima protok od $75,84 m^3/d$. Zahteva se da koncentracija ABS u efluentu bude $0,05 mg/L$ i da kolona radi 120 dana pre nego što dođe do njenog iscrpljenja. Operacija traje $16 h/d$, 5 dana u nedelji.

Rešenje:

1) Vrednosti N_o i K iz zadatka 5 su prikazane na dijagramu. Na dijagramu su prikazane i varijacije ovih parametara u zavisnosti od površinskih brzina.



- 2) Izračunavanje vrednosti protoka u toku trajanja operacije, 16 h/d.

$$Q = \frac{75,84 \text{ m}^3/\text{d}}{16 \frac{\text{h}}{\text{d}}} = 4,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

- 3) Bira se prečnik kolone od 0,75 m i izračunava hidrauličko opterećenje kolone:

$$\text{Površina kolone} = \frac{0,75^2 \pi}{4} = 0,44 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Hidrauličko opterećenje kolone} &= \frac{4,74 \text{ m}^3/\text{h}}{0,44 \text{ m}^2} \\ &= 10,77 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \end{aligned}$$

- 4) Sa dijagrama se očitavaju vrednosti za N_o i K za izračunato hidrauličko opterećenje:

$$N_o = 129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$K = 0,513 \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{h}}$$

- 5) Izračunavanje visine kolone za 120 dana trajanja operacije, rešavanjem sledećih jednačina:

$$x = \frac{C_o V}{N_o} \left[t + \frac{1}{C_o K} \ln \left(\frac{C_o}{C_b} - 1 \right) \right]$$

$$x = \frac{C_o V t}{N_o} + \frac{V}{N_o K} \ln \left(\frac{C_o}{C_b} - 1 \right)$$

$$C = 12 \frac{mg}{L} = 0,012 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_b = 0,5 \frac{mg}{L}$$

$$V = 10,77 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} = 10,77 \frac{m}{h}$$

$$t = 120 d \cdot 8 \frac{h}{d} = 960 h$$

$$x = \frac{960 h \cdot 0,012 \frac{kg}{m^3} \cdot 10,77 \frac{m}{h}}{129 \frac{kg}{m^3}} + \frac{10,77 \frac{m}{h}}{129 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,513 \frac{m^3}{kg \cdot h}} \ln \left(\frac{12}{0,5} - 1 \right)$$

$$x = 0,962 + 0,510 = 1,47 m$$

6) Izračunavanje potrebne zapremine uglja za ispunjavanje kolone:

$$\begin{aligned} \text{Zapremina potrebnog uglja} &= 0,44 m^2 \cdot 1,47 m \\ &= 0,647 m^3 \end{aligned}$$

7) Izračunavanja količine potrebnog uglja na godišnjem nivou bez regeneracije.

$$\frac{\text{Broj izmene punjenja}}{\text{godina}} = \frac{52 \text{ nedelje} \cdot 5 \frac{\text{dan}}{\text{nedelja}}}{120 \frac{\text{dan}}{\text{promena}}} = 2,16$$

Zapremina zahtevanog uglja na godišnjem nivou

$$= 2,16 \text{ izmena} \cdot 0,647 \frac{m^3}{\text{izmena}} = 1,40 m^3$$

Aeracija

Zadatak 1. U eksperimentu koji je rađen sa površinskim aeratorom, na temperaturi od 20 °C i temperaturi vode 15 °C, dobijeni su sledeći podaci:

Vreme, min	Koncentracija rastvorenog kiseonika, mg/L
4	0,8
7	1,8
10	3,3
13	4,5
16	5,5
19	5,2
22	7,3

Odrediti vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase kiseonika, $k_L a$, koristeći metodu linearne regresije.

Rešenje:

Polazeći od osnovne jednačine za prenos mase između gasa i vode:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a \cdot (C_s - C)$$

Integraljenjem u granicama eksperimentalnog sistema i rešavanjem za date uslove, dobija se bilans:

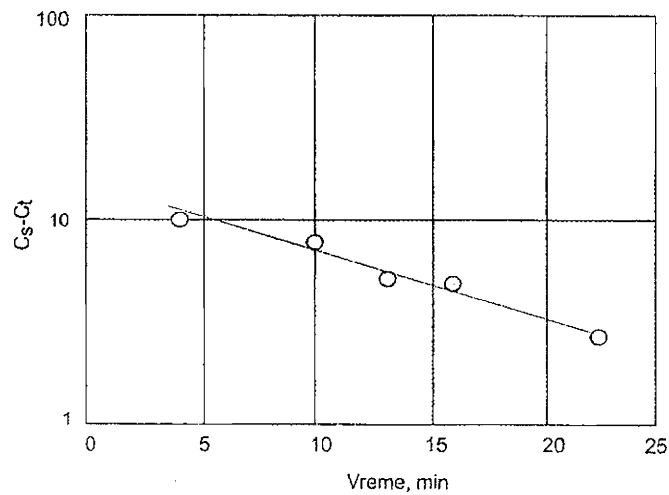
$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-k_L a \cdot t}$$

Odakle se dobija:

$$\log(C_s - C_t) = \log(C_s - C_0) - \frac{k_L a}{2,303} t$$

Na osnovu vrednosti koncentracije zasićenja vode kiseonikom na 15 °C koje iznosi 10,17 mg/L, može se na osnovu ulaznih podataka izračunati vrednost $C_s - C_t$ i formirati tabela, sa odgovarajućim vremenom, a potom nacrtati grafik $(C_s - C_t) = f(t)$:

Vreme min	$C_s - C_t$ mg/L
4	0,8
7	1,8
10	3,3
13	4,5
16	5,5
19	5,2
22	7,3



Sada se za temperaturu od 15 °C računava vrednost $k_L a$:

$$k_L a = 2,303 \frac{\log C_{t1} - \log C_{t2}}{t_2 - t_1} \cdot 60$$

$$k_L a = 2,303 \frac{\log 8,35 - \log 2,85}{22 - 7} \cdot 60$$

$$k_L a = 4,39 \text{ h}^{-1}$$

Vrednost $k_L a$ na 20 °C je:

$$k_L a_{20} = k_L a_{15} \cdot 1,024^{(20-15)} = 4,39 \cdot 1,024^{(20-15)} = 4,94 \text{ h}^{-1}$$

Zadatak 2. Aeracioni test je rađen sa česmnom i otpadnom vodom u identičnom sudu na temperaturi od 16°C. Dobijeni rezultati analize su dati u tabeli. Usvajajući da je koncentracija zasićenja C_s ($C_s = 9,82 \text{ mg/L}$) ista i za otpadnu vodu, odrediti vrednost $k_L a$ za vodu i otpadnu vodu kao i odnos $\alpha = (k_L a)_{ot.v} / (k_L a)_{\check{c}.v}$ pri temperaturi od 20 °C. Usvojiti da je faktor $\theta = 1,024$.

Vreme aeracije, min	Rastvoreni kiseonik, mg/L	
	Česmna voda	Otpadna voda
0	0,0	0,0
20	3,0	2,1
40	4,7	3,5
60	6,4	4,7
80	7,2	5,6
100	7,9	6,4
120	8,5	7,1

Rešenje:

- 1) Iz tabele za ravnotežne koncentracije kiseonika za sistem vazduh-voda se može odrediti ravnotežna koncentracija kiseonika na 16 °C:

$$C_s = 9,82 \text{ mg/L}$$

- 2) Ako se zanemari utrošak kiseonika na metaboličke aktivnosti mikroorganizama onda se jednačina za brzinu promene koncentracije kiseonika,

$$\frac{dc}{dt} = k_L a (C_s - C)$$

nakon integraljenja, može napisati u obliku:

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dc}{C_s - C} = k_L a \int_0^t dt$$

Odnosno:

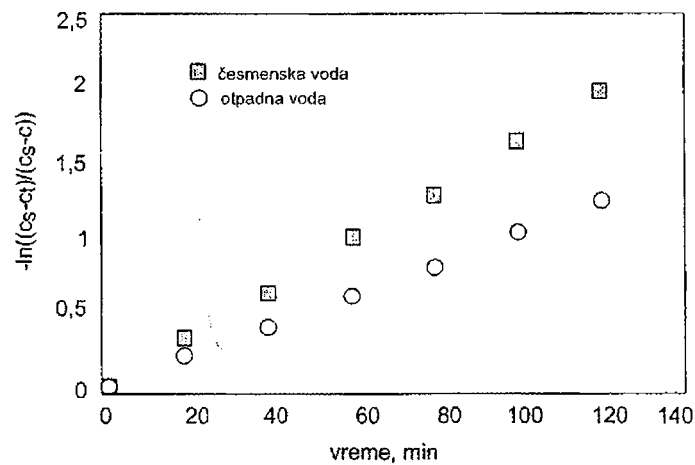
$$-\ln \frac{C_s - C_t}{C_s - C} = k_L a \cdot t$$

Ako se sada za sve raspoložive podatke izračuna vrednost

$-\ln((C_s - C_t)/(C_s - C))$ formira se sledeća tabela.

Vreme aeracije, min	$-\ln((C_s - C_t)/(C_s - C))$	
	Česmenska voda	Otpadna voda
0	0,0	0,0
20	0,36	0,24
40	0,65	0,44
60	1,05	0,65
80	1,32	0,84
100	1,63	1,05
120	2,01	1,28

1) Dobljene vrednosti se mogu grafički predstaviti, pri čemu je nagib dobijenih pravih, zapravo vrednost $k_L a$.



Vrednost $k_L a$ za čistu vodu iz nagiba se može odrediti kao,

$$k_L a = \frac{1 - 0,5}{58 - 30} = 0,018 \text{ min}^{-1} = 1,07 \text{ h}^{-1}$$

2) dok je za otpadnu vodu:

$$k_L a = \frac{1 - 0,5}{97 - 45} = 9,61 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1} = 0,58 \text{ h}^{-1}$$

3) Da bi se odredila vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase kiseonika na drugoj temperaturi, ako je poznata vrednost na jednoj, primenjuje se Hof-Arenijusova korelacija, koja uzima kao referentnu temperaturu od 20 °C:

$$k_L a_{(T)} = k_L a_{(20^\circ\text{C})} \theta^{T-20}$$

odnosno, kada se traži vrednost na 20 °C, onda je:

$$k_L a_{(20^\circ\text{C})} = k_L a_{(T)} \theta^{20-T}$$

pa se zamenom vrednosti dobija:

$$\text{za čistu vodu na } 20^\circ\text{C}, k_L a = 1,07 \cdot 1,024^{20-16} = 1,18 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{za otpadnu vodu na } 20^\circ\text{C}, k_L a = 0,58 \cdot 1,024^{20-16} = 0,64 \text{ h}^{-1}$$

4) Odnos vrednosti zapreminskih koeficijenata prenosa mase kiseonika za otpadnu i čistu vodu na 20 °C, je:

$$\alpha = \frac{(k_L a)_{\text{otpana voda}}}{(k_L a)_{\text{čista voda}}} = \frac{0,64}{1,18} = 0,54$$

Zadatak 3. Izračunati potrebnu snagu uređaja za aerisanje sistema za tretman otpadnih voda, koji mora da obezbedi 890 kg kiseonika na dan. Kiseonik se distribuira u vodu pomoću difuzera čija je efikasnost u pogledu prenosa mase kiseonika u vodu 7,2%. Proces se izvodi na temperaturi od 27 °C a izlazni pritisak koji vazduh mora savladati je 6 m vodenog stuba. Efikasnost uređaja za aerisanje iznosi 80%.

Rešenje:

Potrebno je izračunati maseni protok vazduha kroz sistem za aeraciju. Pošto je efikasnost prenosa kiseonika iz vazduha u vodu 7,2%, potrebna količina kiseonika iznosi:

$$M_{O_2} = \frac{890}{0,072} = 12360 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

A kako u vazduhu ima 23,2% kiseonika, potrebna količina vazduha je:

$$M_{vaz} = \frac{12360}{0,232} = 53280 \frac{kg}{d}$$

Maseni protok vazduha kroz cevovod iznosi:

$$m = \frac{53280}{86400} = 0,617 \frac{kg}{s}$$

Potrebno je definisati apsolutnu temperaturu u cevovodu i izlazni pritisak, a potom izračunati potrebnu snagu:

$$T_0 = 27 + 273 = 300 K$$

Ulazni pritisak je pritisak sredine odakle se uvodi vazduh:

$$P_{atm,H} = 1 atm$$

Izlazni pritisak je pritisak koji deluje na difuzere, pa pretvaranjem dubine vode od 6 m u atm, dobija se:

$$P_D = 1 + \frac{6}{10,345} = 1,58 atm$$

Efikasnost uređaja je data zadatkom i iznosi 0,8.

Potrebna snaga uređaja za aeraciju se izračunava primenom jednačine:

$$P_{kw} = \frac{mRT_0}{8,41e} \left[\left(\frac{P_D}{P_{atm,H}} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

Zamenom vrednosti u prethodnu jednačinu, dobija se da potrebna snaga iznosi:

$$P_{kw} = \frac{0,617 \cdot 8,314 \cdot 300}{8,41 \cdot 0,8} \left[\left(\frac{1,58}{1} \right)^{0,283} - 1 \right] = 31,6 kW$$

Zadatak 4. Postrojenje sa aktivnim muljem za tretman otpadne vode se nalazi na 762 m nadmorske visine. Maksimalna potreba za kiseonikom od 1053 kgO₂/d je u letnjim mesecima kada temperatura vazduha

iznosi 38 °C, a temperatura otpadne vode je 28 °C. Protok vazduha po jednom difuzeru iznosi 0,425 m³/min (na 1 atm ili 101,315 kPa i 20 °C), $\alpha = 0,75$, $\beta = 0,95$. Operativna koncentracija rastvorenog kiseonika (DO) iznosi 2 mg/L. Zbog efikasnosti prenosa mase kiseonika iz vazduha u vodu od 5%, procenat kiseonika u izlaznom gasu je 20,16%. Dubina aeracionog bazena je 4,57 m, a difuzeri su postavljeni na 0,45 m od dna bazena. Karakteristike difuzera su date jednačinom:

$$N_D = 0,04233Q^{0,9}H_D^{0,67}(C_m - C_L) \cdot 1,02^{(T-20)} \cdot \alpha$$

Odrediti:

- 1) brzinu prenosa kiseonika kroz difuzer, N ;
- 2) ukupan protok vazduha kroz sistem za aeraciju;
- 3) ukupnu teoretsku snagu kompresora u kW ako njegova efikasnost iznosi 75%.

Podaci:

$$c_s(28^\circ\text{C}, \text{nivo mora}) = 7,92 \text{ mg/L}, \quad P(\text{nivo mora}) = 760 \text{ mmHg} = 1 \text{ bar},$$

$$P(\text{na } 762 \text{ m}) = 693 \text{ mm Hg}, \quad \rho_{\text{vaz}}(38^\circ\text{C}) = 1,026 \text{ kg/m}^3$$

Rešenje:

- 1) Brzina prenosa kiseonika kroz difuzer se izračunava iz jednačine koja predstavlja karakteristike difuzera. Vidi se da od vrednosti parametara koji figurišu u toj jednačini i onih koji su dati zadatkom nedostaje vrednost za koncentraciju rastvorenog kiseonika na sredini visine bazena, C_m , koja se pretpostavlja da je neka srednja vrednost koncentracije rastvorenog kiseonika u masi vode u aeracionom bazenu. Vrednost C_m se računa pomoću jednačine:

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

C_w predstavlja koncentraciju rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi. Za njeno izračunavanje potrebno je prvo odrediti koncentraciju zasićenja rastvorenim kiseonikom za čistu vodu, C_s .

Ovo postrojenje se ne nalazi na nivou mora već na nadmorskoj visini od 762 m, a temperatura vode nije standardnih 20 °C nego 28 °C, što zahteva da se izračuna odgovarajuća vrednost koncentracije zasićenja kiseonikom na ovim radnim uslovima:

$$C_s(28^\circ\text{C}, 762\text{m}) = c_s(28^\circ\text{C}, \text{nivo mora}) \cdot \frac{p(762\text{m})}{p(\text{nivo mora})}$$

$$C_s(28^\circ\text{C}, 762\text{m}) = 7,92 \cdot \frac{693}{760} = 7,22 \text{ mg/L} \quad (\text{za čistu vodu})$$

Dobijena vrednost ukazuje da se sa povećanjem temperature i povećanjem nadmorske visine (smanjivanjem pritiska), smanjuje rastvorljivost kiseonika u vodi.

Množenjem dobijene vrednosti sa korekcionim faktorom β koji u sebi sadrži uticaj prisutnih zagađujućih materija u otpadnoj vodi, dobija se koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi pri radnim uslovima:

$$C_w = \beta \cdot C_s(28^\circ\text{C}, 762\text{m}) = 0,95 \cdot 7,22 = 6,86 \text{ mg/L}$$

(za otpadnu vodu)

Takođe se može zaključiti, poređenjem vrednosti koncentracije kiseonika za čistu i otpadnu vodu, da prisustvo zagađujućih materija utiče na smanjenje koncentracije rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi.

Za nastavak proračuna potrebno je da se pretpostavi da se vazduh sastoji od 21% kiseonika i 79% azota, odnosno 100 mol vazduha se sastoji od 21 mol kiseonika i 79 mol azota.

Pošto je efikasnost prenosa kiseonika iz vazduha u vodu 5%, treba izračunati koliki je % udeo kiseonika u izlaznom gasu, odnosno % udeo kiseonika u vazduhu koji se nije rastvorio u vodi i izlazi iz aeracionog bazena.

Količina kiseonika u izlaznom vazduhu:

$$21 \cdot (1 - 0,05) = 19,95 \text{ mol } O_2$$

Procenat kiseonika u izlaznom vazduhu:

$$O_e = \frac{19,95}{(19,95 + 79)} \cdot 100 = 20,16\%$$

Dalje je potrebno da se izračuna pritisak koji deluje na difuzer P_D . Taj pritisak je jednak zbiru pritiska vode iznad difuzera P_{H_D} i atmosferskog pritiska $P_{atm,H}$:

$$P_D = P_{H_D} + P_{atm,H}$$

$$P_{H_D} = 4,57m - 0,45m = 4,12mH_2O = 4,12 \cdot 9806,4 \\ = 40,4 \text{ kPa}$$

Atmosferski pritisak iznad postrojenja nije jednak standardnom pritisku, zbog toga što se postrojenje nalazi na određenoj nadmorskoj visini, pa njegova vrednost iznosi:

$$P_{atm,H} = 101,37 \cdot \frac{693}{760} = 92,43 \text{ kPa}$$

Sabiranjem izračunatih pritisaka dobija se da je pritisak koji deluje na difuzere jednak:

$$P_D = 40,4 + 92,43 = 133 \text{ kPa}$$

Nakon izračunavanja potrebnih vrednosti omogućeno je i izračunavanje koncentracije kiseonika na sredini aeracionog bazena:

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right) = 6,86 \cdot \left(\frac{133}{203} + \frac{20,16}{42} \right) = 7,79 \text{ mg/L}$$

Da bi se izračunala brzina prenosa kiseonika kroz difuzer N , preostalo je da se izračuna visina na kojoj se difuzeri nalaze od vrha bazena:

$$H_D = 4,57 - 0,45 = 4,12m$$

Na kraju se dobija da je brzina prenosa kiseonika kroz jedan difuzer:

$$N_D = (0,04233) \cdot (0,425)^{0,9} \cdot (4,12)^{0,67} (7,79 - 2,0) \\ \cdot 1,02^{28-20} \cdot 0,75$$

$$N_D = 0,257 \frac{kgO_2}{h}$$

2) Ukupan protok vazduha se dobija množenjem broja difuzera sa protokom kroz jedan difuzer.

Broj difuzera se dobija deljenjem vrednosti maksimalne potrebe za kiseonikom, koja je data zadatkom, sa protokom kiseonika kroz jedan difuzer:

$$\begin{aligned} \text{Ukupan broj difuzera je} &= 1053 \frac{kgO_2}{d} \cdot \frac{d}{24h} \cdot \frac{h}{0,257kgO_2} \\ &= 170,7 = 171 \end{aligned}$$

Tada ukupan protok vazduha kroz sistem za aeraciju iznosi:

$$Q_{uk} = 171 \cdot 0,425 \frac{m^3}{min} = 72,7 \frac{m^3}{min} \text{ (na standardim uslovima)}$$

Ne treba zaboraviti da se karakteristike difuzera daju za standardne uslove (20 °C i 1 atm). Ovaj sistem za tretman otpadnih voda ne radi na standardnim uslovima pa je potrebno izračunati stvarni protok vazduha za radne uslove:

Atmosferski pritisak iznad postrojenja:

$$P_{atm,H} = 1 atm \cdot \frac{693}{760} = 0,9118 atm$$

Apsolutna temperatura vazduha na 20 °C : $T_1 = 20 + 273 = 293 K$

Apsolutna temperatura vazduha na 38 °C : $T_2 = 38 + 273 = 311 K$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = \frac{1 atm}{0,9118 atm} \cdot \frac{311K}{293K} \cdot \frac{72,7m^3}{min}$$

Pa se dobija da je protok vazduha kroz sistem za aeraciju na radnim uslovima jednak:

$$Q_{vaz.uk} = V_2 = 84,6 \frac{m^3}{min}$$

3) Potrebna snaga uređaja za aeraciju se izračunava pomoću jednačine:

$$P_{kw} = \frac{mRT_0}{8,41e} \left[\left(\frac{P_D}{P_{atm,H}} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

$$\text{Ulazni pritisak: } P_{atm,H} = 101,37 \cdot \left(\frac{693}{760} \right) = 92,4 \text{ kPa}$$

Izlazni pritisak (pritisak koji se mora savladati na izlazu iz difuzera):

$$P_D = 133 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 311K = 38 \text{ °C}$$

Efikasnost uređaja je $e = 0,75$

Podatak koji nedostaje za izračunavanje snage uređaja je maseni protok vazduha koji se izračunava na sledeći način:

$$m = Q \cdot \rho = 84,6 \frac{m^3}{min} \cdot \frac{min}{60 s} \cdot 1,026 \frac{kg}{m^3} = 1,447 kg/s$$

Kada se sve uvrsti u jednačinu dobija se da je potrebna snaga uređaja za aeraciju:

$$P_{kw} = \frac{1,447 \cdot 8,314 \cdot 311}{29,7 \cdot 0,283 \cdot 0,75} \cdot \left[\left(\frac{133}{92,4} \right)^{0,283} - 1 \right] = 64,4 \text{ kW}$$

Zadatak 5. Postrojenje za tretman otpadne vode se nalazi na nadmorskoj visini od 610 m. U postrojenju bazen sa aktivnim muljem se aeriše pomoću difuzera. Dubina vode u bazenu je 4,8 m a difuzeri su postavljeni 0,5 m od dna bazena. Protok vazduha kroz jedan difuzer iznosi $0,380 \text{ m}^3/\text{min}$. Radna koncentracija kiseonika u bazenu je $2,0 \text{ mg/L}$. Koncentracija kiseonika na sredini visine bazena iznosi $7,7 \text{ mg/L}$, pri čemu je temperatura vode 28 °C . Korekcionni faktori α ima vrednost 0,75. Izračunati:

- 1) pritisak iznad postrojenja u barima;
- 2) brzinu prenosa kiseonika kroz difuzer;
- 3) pritisak koji deluje na difuzere u barima.

Karakteristike difuzera:

$$N_D = 0,04233G^{0,9}H_D^{0,67}(C_m - C_L) \cdot 1,02^{(T-20)} \cdot \alpha$$

$$\text{Podaci: } C_s(28^\circ\text{C, nivo mora}) = 8,34 \text{ mgO}_2/\text{L,}$$

$$C_s(28^\circ\text{C, 610 m}) = 7,75 \text{ mgO}_2/\text{L, } P(\text{nivo mora}) = 1 \text{ bar}$$

Rešenje:

- 1) Pritisak na nadmorskoj visini se računa pomoću odnosa koncentracija zasićenja kiseonikom na datoj nadmorskoj visini i na nivou mora:

$$P(610 \text{ m}) = P(\text{nivo mora}) \cdot \frac{C_s(28^\circ\text{C, 610m})}{C_s(28^\circ\text{C, nivo mora})}$$

$$P(610 \text{ m}) = 1 \cdot \frac{7,75}{8,34} = 0,93 \text{ bar}$$

- 2) Visina na kojoj su postavljeni difuzeri, gledano od vrha aeracionog bazena je:

$$H_D = 4,8 - 0,5 = 4,3 \text{ m}$$

Pa je brzina prenosa kiseonika kroz difuzer jednaka:

$$N_D = 0,04233 \cdot 0,380^{0,9} \cdot 4,3^{0,67} (7,7 - 2,0) \cdot 1,02^{(28-20)} \cdot 0,75$$

$$N_D = 0,236 \text{ kgO}_2/\text{h}$$

Izračunavanje pritiska koji deluje na difuzere:

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_D}$$

$$P_{H_D} = 4,8 - 0,5 = 4,3 \text{ m} = 4,3 \cdot 0,1 \text{ bar} = 0,43 \text{ bar}$$

$$P_{atm,H} = 0,93 \text{ bar}$$

$$P_D = 0,43 + 0,93 = 1,36 \text{ bar}$$

Zadatak 6. Biološka obrada otpadnih voda na postrojenju za tretman otpadnih voda je zasnovana na korišćenju aktivnog mulja. Atmosferski pritisak iznad postrojenja iznosi 1 atm. Aktivni mulj se nalazi u aeracionom bazenu dubine 4,7 m. Na 0,46 m od dna bazena su postavljeni difuzeri a protok vazduha kroz jedan difuzer iznosi 0,199 m³/min. Procenat

kiseonika u izlaznom vazduhu je 20%. Ukupna potreba za kiseonikom iznosi 3600 kg/d. Temperatura otpadne vode je 20 °C a vazduha 35 °C. Operativna koncentracija rastvorenog kiseonika je 2 mg/L. Karakteristike difuzera su date jednačinom:

$$N_D = 0,0937G^{0,9}H_D^{0,69}(C_m - C_L)1,02^{T-20}\alpha$$

Odrediti:

- 1) brzinu prenosa kiseonika kroz svaki difuzer;
- 2) broj difuzera;
- 3) ukupan protok vazduha kroz ceo sistem za aeraciju.

Podaci: $\alpha=0,75$, $\beta=0,95$, $C_s(20^\circ\text{C}) = 9,2 \text{ mg/L}$, ρ_{vaz} na $35^\circ\text{C} = 1,146 \text{ kg/m}^3$

Rešenje:

- 1) Izračunavanje brzine prenosa kiseonika kroz jedan difuzer.

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 9,2 = 8,74 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_D}$$

$$P_{H_D} = 4,7 - 0,46 = 4,24 \text{ m H}_2\text{O} = \frac{4,24}{1,02 \cdot 10^{-4}} = 41,6 \text{ kPa}$$

$$P_D = 41,6 \text{ kPa} + 101,3 \text{ kPa} = 143 \text{ kPa}$$

$$C_m = 8,74 \cdot \left(\frac{143}{203} + \frac{20}{42} \right) = 10,3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$N_D = 0,0937 \cdot 0,199^{0,9} \cdot 4,24^{0,69} \cdot (10,3 - 2) \cdot 1,02^{20-20} \cdot 0,75 = 0,370 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

- 2) Izračunavanje broja difuzera.

$$\text{Broj difuzera} = \frac{Q_{uk}}{N_{O_D}} = \frac{3600 \frac{\text{kgO}_2}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24\text{h}}}{0,370 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}} \approx 406$$

3) Određivanje ukupnog protoka vazduha kroz sistem za aeraciju.

$$Q_{uk}(vazduha) = 406 \cdot 0,199 \frac{m^3}{min} = 80,8 \frac{m^3}{min} = 1,35 \frac{m^3}{s}$$

→ na standardnim uslovima

$$T_1(20^\circ C) = 20 + 273 = 293 K$$

$$T_2(35^\circ C) = 35 + 273 = 308 K$$

$$P_1 = P_2 = 1 atm$$

$$Q_{uk}(vazduha) = \dot{V}_1$$

$$\frac{P_1 \dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \dot{V}_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = 1 \cdot \frac{308}{293} \cdot 80,8 = 85 \frac{m^3}{min} = 1,42 \frac{m^3}{s}$$

→ na radnim uslovima

Zadatak 7. Biološka obrada otpadnih voda u postrojenju je zasnovana na korišćenju aktivnog mulja. Atmosferski pritisak iznad postrojenja iznosi 1 atm. Aktivni mulj se nalazi u aeraciom bazenu dužine 122 m i dubine 4,7 m. Na 0,46 m od dna bazena su postavljeni difuzeri a protok vazduha kroz jedan difuzer iznosi 0,199 m³/min. Procenat kiseonika u izlaznom vazduhu je 20%. Ukupna potreba za kiseonikom iznosi 3600 kg/d. Temperatura otpadne vode je 20 °C a vazduha 35 °C (ρ_{vaz} na 35 °C = 1,146 kg/m³). Operativna koncentracija rastvorenog kiseonika je 2 mg/l. Karakteristike difuzera su date jednačinom:

$$N_D = 0,0937 Q^{0,9} H_D^{0,69} (C_m - C_L) 1,02^{T-20} \alpha$$

Odrediti:

- 1) brzinu prenosa kiseonika kroz svaki difuzer;
- 2) broj difuzera;
- 3) ukupan protok vazduha kroz ceo sistem za aeraciju;
- 4) teoretsku snagu kompresora čija je efikasnost 75%;

5) tri puta u toku nedelje je meren protok vazduha za svaku četvrtinu dužine aeracionog bazena i uočeno je da ukupna količina vazduha nije ravnomerno raspoređena po četvrtinama.

6) Rezultati merenja:

Merenje	I L/4	II L/4	III L/4	IV L/4
1.	35%	26%	20%	19%
2.	35%	23%	25%	17%
3.	37%	25%	22%	16%

Da li je u toku ova tri dana kada je merenje vršeno dolazilo do problema u radu difuzera i zašto?

Podaci: $\alpha=0,75$, $\beta=0,95$, $C_s(20^\circ\text{C}) = 9,2 \text{ mg/L}$

Rešenje:

1) Koncentracija zasićenja kiseonikom na sredini visine aeracionog bazena je jednaka:

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 9,2 = 8,74 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

a pritisak koji deluje na difuzere je:

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_D}$$

$$P_{H_D} = 4,7 - 0,46 = 4,24 \text{ m H}_2\text{O} = \frac{4,24}{1,02 \cdot 10^{-4}} = 41,6 \text{ kPa}$$

$$P_D = 41,6 \text{ kPa} + 101,3 \text{ kPa} = 143 \text{ kPa}$$

Oдавde se dobija da je:

$$C_m = 8,74 \cdot \left(\frac{143}{203} + \frac{20}{42} \right) = 10,3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Ubacivanjem izračunatih vrednosti u jednačinu koja opisuje karakteristike difuzera, dobija se da je brzina prenosa kiseonika kroz difuzer:

$$N_D = 0,0937 \cdot 0,199^{0,9} \cdot 4,24^{0,69} \cdot (10,3 - 2) \cdot 1,02^{20-20} \cdot 0,75 = 0,370 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

2) Izračunavanje broja difuzera.

$$\text{Broj difuzera} = \frac{Q_{uk}}{N_{OD}} = \frac{3600 \frac{\text{kgO}_2}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24\text{h}}}{0,370 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} \approx 406$$

3) Izračunavanje ukupnog protoka vazduha kroz sistem za aeraciju.

$$Q_{uk}(\text{vazduha}) = 406 \cdot 0,199 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 80,8 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1,35 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

→ na standardnim uslovima

$$T_1(20 \text{ }^\circ\text{C}) = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

$$T_2(35 \text{ }^\circ\text{C}) = 35 + 273 = 308 \text{ K}$$

$$P_1 = P_2 = 1 \text{ atm}$$

$$Q_{uk}(\text{vazduha}) = \dot{V}_1$$

$$\frac{P_1 \dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \dot{V}_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = 1 \cdot \frac{308}{293} \cdot 80,8 = 85 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1,42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

→ na radnim uslovima

4) Izračunavanje snage uređaja za aeraciju.

$$P_{kw} = \frac{mRT_0}{8,41e} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,283} - 1 \right]$$

$$m = Q_{uk}(\text{vazduha}) \cdot \rho_{\text{vazduha}} = 1,42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,146 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,63 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{kw} = \frac{1,63 \cdot 8,315 \cdot 308}{8,41 \cdot 0,75} \cdot \left[\left(\frac{143}{101,3} \right)^{0,283} - 1 \right] = 68kW$$

5) Prvog i trećeg dana merenja nije bilo problema u radu difuzera jer je zabeležen postepeni pad količine prenetog vazduha po dužini aeracionog bazena usled podužnog trenja.

Drugog dana merenja uočava se nepravilan rad difuzera na drugoj četvrtini dužine jer je zabeležena manja količina prenetog vazduha nego na trećoj četvrtini.

Zadatak 8. Postrojenje za tretman otpadnih voda sa aktivnim muljem se nalazi na nivou mora. Aerisanje bazena sa aktivnim muljem se obavlja difuznom aeracijom. Dubina aeracionog bazena je 4 m. Difuzeri su postavljeni na 0,40 m od dna bazena, a protok vazduha kroz jedan difuzer iznosi 0,145 m³/min. Procenat kiseonika u izlaznom vazduhu je 20%. Potreba za kiseonikom u letnjim mesecima kada je temperatura vode 28 °C, a vazduha 38 °C iznosi 1100 kg/d. Udeo kiseonika u vazduhu na pritisku od 1 atm je 21%, a Henrijeva konstanta na 28 °C iznosi 25,3 atm · m³/kg. Vrednost korekcionog faktora α je 0,75 a β 0,95. Operativna koncentracija rastvorenog kiseonika je 2 mg/L. Karakteristike difuzera su date jednačinom:

$$N_D = 0,0937Q^{0,9}H_D^{0,69}(C_m - C_L)1,02^{T-20}\alpha$$

Odrediti ukupan protok vazduha kroz sistem za aeraciju na radnim uslovima.

Rešenje:

$$C_s(28^\circ\text{C}) = \frac{P_{O_2}}{H_e(28^\circ\text{C})} = \frac{y_{O_2} \cdot P}{H_e(28^\circ\text{C})} = \frac{0,21 \cdot 1\text{atm}}{25,3 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}}} = 8,34 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_w = \beta \cdot C_s = 0,95 \cdot 8,34 = 7,9 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 8,34 = 7,9 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_D}$$

$$P_{H_D} = 4 - 0,4 = 3,6 \text{ m H}_2\text{O} = \frac{3,6}{1,02 \cdot 10^{-4}} = 35,3 \text{ kPa}$$

$$P_D = 35,3 \text{ kPa} + 101,3 \text{ kPa} = 136,6 \text{ kPa}$$

$$C_m = 7,9 \cdot \left(\frac{136,6}{203} + \frac{20}{42} \right) = 9,1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$N_D = 0,0937 \cdot 0,145^{0,9} \cdot 3,6^{0,69} \cdot (9,1 - 2) \cdot 1,02^{28-20} \cdot 0,75 \\ = 0,249 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}}$$

$$\text{Broj difuzera} = \frac{Q_{uk}}{N_{O_D}} = \frac{1100 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}}{0,249 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24\text{h}}{\text{d}}} = 184$$

$$Q_{uk}(\text{vazduha}) = 184 \cdot 0,145 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 26,68 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \\ = 1601 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ na standardnim uslovima}$$

$$T_1(20^\circ\text{C}) = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

$$T_2(38^\circ\text{C}) = 38 + 273 = 311 \text{ K}$$

$$P_1 = P_2 = 1 \text{ atm}$$

$$Q_{uk}(\text{vazduha}) = \dot{V}_1$$

$$\frac{P_1 \dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \dot{V}_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = 1 \cdot \frac{311}{293} \cdot 1601 \\ = 1699 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ na radnim uslovima}$$

Zadatak 9. Postrojenje za tretman otpadnih voda sa aktivnim muljem se nalazi na nivou mora. Pomoću difuzera se obavlja aerisanje bazena sa

aktivnim muljem. Dubina aeracionog bazena je 5 m. Difuzeri su postavljeni na 0,45 m od dna bazena a protok vazduha kroz jedan difuzer iznosi $0,200 \text{ m}^3/\text{min}$. Procenat kiseonika u izlaznom vazduhu je 20%. Potreba za kiseonikom u letnjim mesecima kada je temperatura vode 28°C a vazduha 35°C iznosi 1000 kg/d . Pritisak kiseonika u vazduhu je $0,21 \text{ atm}$ a Henrijeva konstanta na 28°C iznosi $25,3 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$. Vrednost korekcionog faktora α je 0,75 a β 0,95. Operativna koncentracija rastvorenog kiseonika je 2 mg/L . Karakteristike difuzera su date jednačinom:

$$N_D = 0,0937 Q^{0,9} H_D^{0,69} (C_m - C_L) 1,02^{T-20} \alpha$$

Odrediti ukupan protok vazduha kroz sistem za aeraciju na radnim uslovima.

Rešenje:

$$C_s(28^\circ\text{C}) = \frac{P_{O_2}}{H_e(28^\circ\text{C})} = \frac{0,21 \text{ atm}}{25,3 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}}} = 8,34 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 8,34 = 7,9 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_m = C_w \left(\frac{P_D}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

$$P_D = P_{atm,H} + P_{H_2O}$$

$$P = 5 - 0,45 = 4,55 \text{ m H}_2\text{O} = \frac{4,55}{1,02 \cdot 10^{-4}} = 44,6 \text{ kPa}$$

$$P_D = 44,6 \text{ kPa} + 101,3 \text{ kPa} = 145,9 \text{ kPa}$$

$$C_m = 7,9 \cdot \left(\frac{145,9}{203} + \frac{20}{42} \right) = 9,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$N_D = 0,0937 \cdot 0,200^{0,9} \cdot 4,55^{0,69} \cdot (9,4 - 2) \cdot 1,02^{28-20} \cdot 0,75 = 0,407 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}}$$

$$\text{Broj difuzera} = \frac{Q_{uk}}{N_{OD}} = \frac{1000 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}}{0,407 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{d}}} = 103$$

$$Q_{uk}(vazduha) = 103 \cdot 0,200 \frac{m^3}{min} = 20,6 \frac{m^3}{min}$$

$$= 1236 \frac{m^3}{h} \text{ na standardnim uslovima}$$

$$T_1(20^\circ C) = 20 + 273 = 293 K$$

$$T_2(35^\circ C) = 35 + 273 = 308 K$$

$$P_1 = P_2 = 1 atm$$

$$Q_{uk}(vazduha) = \dot{V}_1$$

$$\frac{P_1 \dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \dot{V}_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = 1 \cdot \frac{308}{293} \cdot 1236$$

$$= 1299 \frac{m^3}{h} \text{ na radnim uslovima}$$

Zadatak 10. Postrojenje za tretman otpadnih voda sa aktivnim muljem je locirano na nadmorskoj visini od 610 m. Aerisanje bazena se obavlja mehaničkom aeracijom. Potreba za kiseonikom u letnjim mesecima kada je temperatura vode 28 °C iznosi 1220 kg/d. Udeo kiseonika u vazduhu na pritisku od 1 atm je 21%, a Henrijeva konstanta na 28 °C iznosi 25,3 atm · m³/kg. Vrednost korekcionog faktora α je 0,75 a β 0,95. Na standardnim uslovima proizvođač aeratora je utvrdio vrednost brzine prenosa mase kiseonika od 1,34 kg/kW h. Potrebna koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi je 2,0 mg/L. Odrediti teoretsku snagu aeratora.

Podaci: $P(\text{na } 610m) = 706 \text{ mmHg}$, $P(\text{nivo mora}) = 760 \text{ mmHg}$,
 $C_s(20^\circ C) = 9,2 \text{ mg/L}$

Rešenje:

Koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika se izračunava na osnovu Henrijevog zakona odnosno primenom jednačine:

$$C_s = \frac{P_{O_2}}{H_e}$$

Pa se dobija da je koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi na 28 °C jednaka:

$$C_s(28^\circ\text{C}) = \frac{p_{O_2}}{H_e(28^\circ\text{C})} = \frac{y_{O_2} \cdot P}{H_e(28^\circ\text{C})} = \frac{0,21 \cdot 1 \text{ atm}}{25,3 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}}} = 8,34 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Zbog nadmorske visine, koncentracija zasićenja rastvorenog kiseonika je manja od one koja je na pritisku od 1 atm, i iznosi:

$$\begin{aligned} C_s(28^\circ\text{C}, 610\text{m}) &= C_s(28^\circ\text{C}, \text{nivo mora}) \cdot \frac{706}{760} \\ &= 8,34 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 0,9289 = 7,75 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \end{aligned}$$

A koncentracija rastvorenog kiseonika za otpadnu vodu pri radnim uslovima je:

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 7,75 = 7,36 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Brzina prenosa kiseonika mehaničkim aeratorima se izračunava primenom jednačine:

$$N_M = N_{0M} \cdot \left(\frac{C_w - C_L}{C_{s,20}} \right) \cdot 1,024^{T-20} \cdot \alpha$$

Zamenom vrednosti dobija se:

$$N_M = 1,34 \cdot \left(\frac{7,36 - 2}{9,2} \right) \cdot 1,024^{28-20} \cdot 0,75 = 0,709 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

Teoretska snaga mehaničkog aeratora se dobija deljenjem potrebne količine kiseonika sa brzinom prenosa kiseonika i iznosi:

$$P_{kw} = \frac{Q_{mO_2}}{N_{0M}} = \frac{1220 \frac{\text{kgO}_2}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \text{ h}}}{0,709 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}}} = 72 \text{ kW}$$

Zadatak 11. Na postrojenju za tretman komunalnih otpadnih voda kiseonik se u bazen sa aktivnim muljem unosi pomoću mehaničkih aeratora snage 65 kW. Temperatura otpadne vode je 25 °C a vazduha 38 °C. Vrednost korekcionog faktora α je 0,75 a β 0,95. Na standardnim uslovima proizvođač aeratora je utvrdio vrednost brzine prenosa mase kiseonika od 1,67 kg/kW h. Potrebna koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi je 2,0 mg/L. Odrediti maseni protok kiseonika (kg/d).

Podaci: $C_s(25^\circ\text{C}) = 8,25 \text{ mg/L}$, $C_s(20^\circ\text{C}) = 9,2 \text{ mg/L}$

Rešenje:

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 8,25 = 7,84 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$N_M = N_{O_M} \left(\frac{C_w - C_L}{C_{s,20}} \right) \cdot 1,024^{T-20} \alpha$$

$$N_M = 1,67 \cdot \left(\frac{7,84 - 2}{9,2} \right) \cdot 1,024^{25-20} \cdot 0,75 = 0,895 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

$$P_{kw} = \frac{Q_{mO_2}}{N_{O_M}}$$

$$\begin{aligned} Q_{mO_2} &= P_{kw} \cdot N_{O_M} = 65 \text{ kW} \cdot 0,895 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}} = 58 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}} \\ &= 1392 \frac{\text{kgO}_2}{\text{d}} \end{aligned}$$

Zadatak 12. Postrojenje za tretman otpadnih voda se nalazi na nadmorskoj visini od 1067 m. Bazen sa aktivnim muljem se aeriše pomoću mehaničkih aeratora. Temperatura otpadne vode je 15 °C. Vrednost korekcionog faktora α je 0,75 a β 0,95. Na standardnim uslovima proizvođač aeratora je utvrdio vrednost brzine prenosa mase kiseonika od 1,30 kg/kW h. Potreba za kiseonikom iznosi 1300 kg/d, a zahtevana koncentracija rastvorenog kiseonika u otpadnoj vodi je 2,0 mg/L. Izračunati teoretsku snagu mehaničkog aeratora.

Podaci: $C_s(15^\circ\text{C}) = 9,73 \text{ mg/L}$, $C_s(20^\circ\text{C}) = 9,2 \text{ mg/L}$,
 $P(\text{nivo mora}) = 760 \text{ mmHg}$ $P(1067 \text{ m}) = 668 \text{ mmHg}$

Rešenje:

$$C_s(15^\circ\text{C}, 1067 \text{ m}) = C_s(15^\circ\text{C}, \text{nivo mora}) \cdot \frac{P(1067 \text{ m})}{P(\text{nivo mora})}$$

$$C_s(15^\circ\text{C}, 1067 \text{ m}) = 9,73 \cdot \frac{668}{760} = 8,55 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$C_w = \beta \cdot C_{s,T,H} = 0,95 \cdot 8,55 = 8,12 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$N_M = N_{O_M} \left(\frac{C_w - C_L}{C_{s,20}} \right) \cdot 1,024^{T-20} \alpha$$

$$N_M = 1,30 \left(\frac{8,12 - 2}{9,2} \right) \cdot 1,024^{15-20} \cdot 0,75 = 0,576 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

$$P_{\text{kW}} = \frac{Q_{mO_2}}{N_{O_M}} = \frac{1300 \frac{\text{kgO}_2 \cdot \text{d}}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24\text{h}}}{0,576 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}}} = 94 \text{ kW}$$

Kinetički parametri i bilansi bioprocasa

Zadatak 1. Odrediti kinetičke parametre mikrobiološkog rasta, K_s , Y , μ_m , k_d korišćenjem vrednosti datih u tabeli, dobijenih iz šaržnog sistema sa kompletnim mešanjem bez recirkulacije.

Merenje br.	S_0 mg/L COD	S mg/L COD	$\tau = \theta$ d	X mg VSS/L
1	400	13	3,2	123
2	400	24	2,0	127
3	400	33	1,6	127
4	400	47	1,3	124
5	400	66	1,1	119

Rešenje:

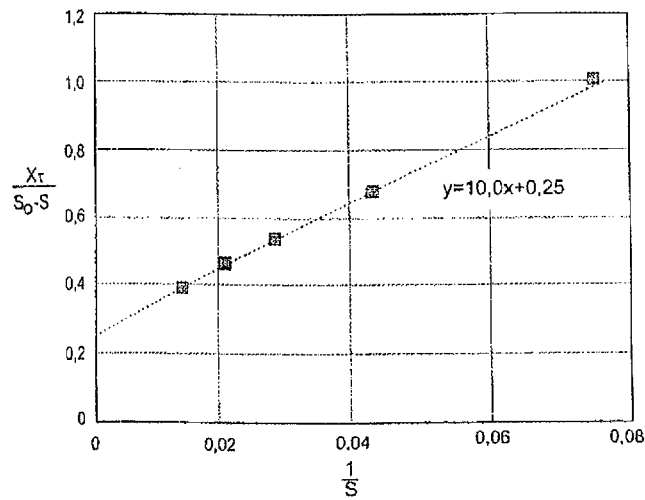
- 1) Iz bilansa za supstrat proizlazi sledeća jednačina za određivanje K_s i k :

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

Jednačina predstavlja jednačinu prave u kordinatnom sistemu $\left[\frac{X\tau}{S_0 - S}, \frac{1}{S} \right]$, čiji je odsečak jednak $\frac{1}{k}$, a nagib prave je $\frac{K_s}{k}$.

Za crtanje grafika potrebno je izračunavanje vrednosti datih u sledećoj tabeli:

Merenje br.	$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$ d	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
1	387	393,6	1,017	0,077
2	376	254,0	0,676	0,042
3	367	203,2	0,554	0,030
4	353	161,2	0,457	0,021
5	334	130,9	0,392	0,015



Očitavanjem vrednosti sa grafika dobija se:

$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,25 \text{ d}$$

$$k = 4,0 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d}$$

$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = \frac{0,8 - 0,6}{0,058 - 0,038} = 10,0 \frac{mg}{L} \cdot d$$

$$K_s = 10,0 \frac{mg}{L} \cdot d \cdot 4,0 d^{-1}$$

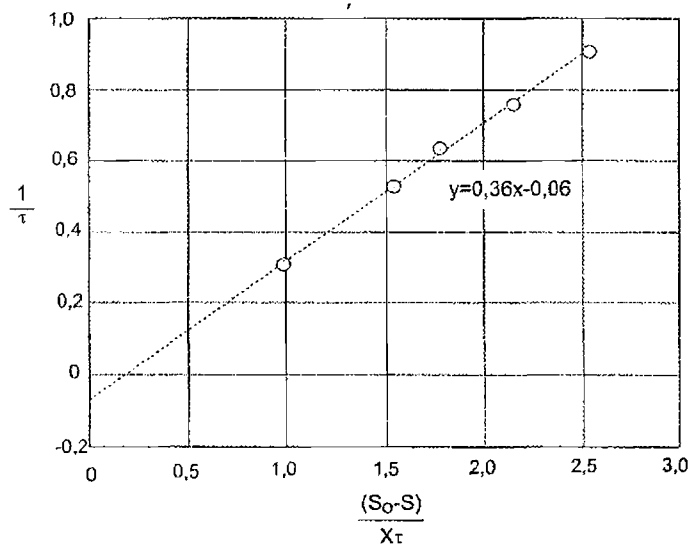
$$K_s = 40,0 \frac{mg}{L}$$

2) Primenom bilansa za biomasu proizilazi sledeća jednačina za izračunavanje dva kinetička parametra:

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X_\tau} - k_d$$

Jednačina predstavlja jednačinu prave u kordinatnom sistemu $\left[\frac{1}{\tau}, \frac{S_0 - S}{X_\tau} \right]$, odsečak je jednak $-k_d$, a nagib prave je jednak Y . Za crtanje grafika potrebne su vrednosti date u tabeli:

Merenje br.	$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S)}{X\tau}$ d^{-1}
1	0,313	0,983
2	0,500	1,480
3	0,625	1,806
4	0,769	2,190
5	0,909	2,552



Očitavanjem vrednosti sa grafika dobijaju se vrednosti:

$$\text{odsečak} = -k_d = -0,060 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0,060 \text{ d}^{-1}$$

$$\text{nagib} = Y = \frac{0,4 - 0,2}{1,2 - 0,65}$$

$$Y = 0,36 \frac{m_{g_{bio}}}{m_{g_{sup}}}$$

Preostalo je da se izračuna četvrti kinetički parametar, maksimalna specifična brzina rasta mikroorganizama, primenom sledeće jednačine:

$$\mu_m = kY$$

Zamenom vrednosti dobija se:

$$\mu_m = 4,0 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d} \cdot 0,36 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = 1,44 d^{-1}$$

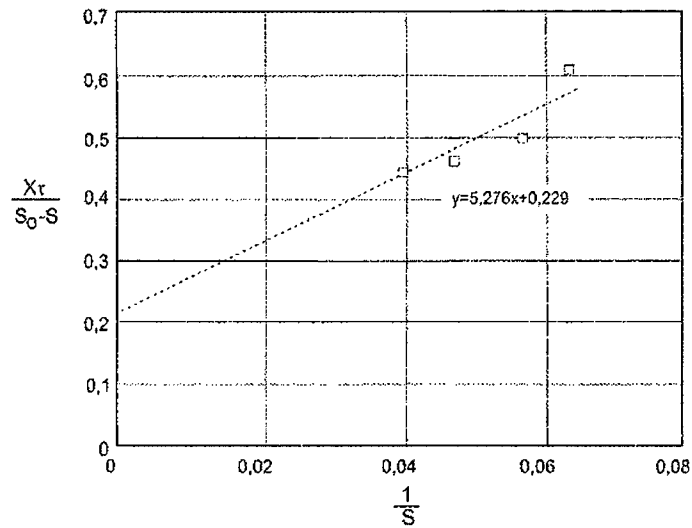
Zadatak 2. U laboratorijskom bioreaktoru, koji je radio kontinualno po principu hemostata, ispitivan je proces prečišćavanja otpadnih voda. Bioreaktor je radio na nekoliko stacionarnih stanja i vremena boravka. Eksperimentalni podaci koji su dobijeni uzimanjem uzoraka iz bioreaktora su dati u tabeli. Na osnovu eksperimentalnih podataka, odrediti kinetičke parametre rasta za ovaj sistem.

$\tau[d]$	$S_0[mg/L]$	$S[mg/L]$	$X[mg/L]$
2,0	500	15	150
1,8	480	17	142
1,6	460	22	130
1,4	442	25	135

Rešenje:

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$ d	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
485	300	0,619	0,067
463	225,6	0,487	0,059
438	208	0,475	0,046
417	189	0,453	0,040



$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,229 \text{ d}$$

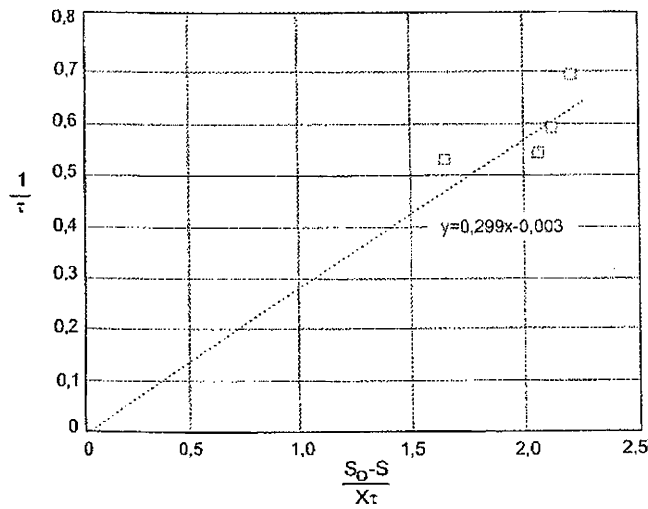
$$k = 4,4 \text{ d}^{-1}$$

$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = 5,276 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{d}$$

$$K_s = 5,2756 \cdot 4,4 = 23,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X\tau} - k_d$$

$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S) X\tau}{d^{-1}}$
0,50	1,62
0,55	2,05
0,62	2,11
0,71	2,21



$$\text{odsečak} = -k_d = -0,003 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0,003 \text{ d}^{-1}$$

$$\text{nagib} = Y = 0,3 \frac{\text{mg}}{\text{mg}}$$

$$k = \frac{\mu_m}{Y}$$

$$\mu_m = k \cdot Y = 4,4 \cdot 0,3 = 1,32 \text{ d}^{-1}$$

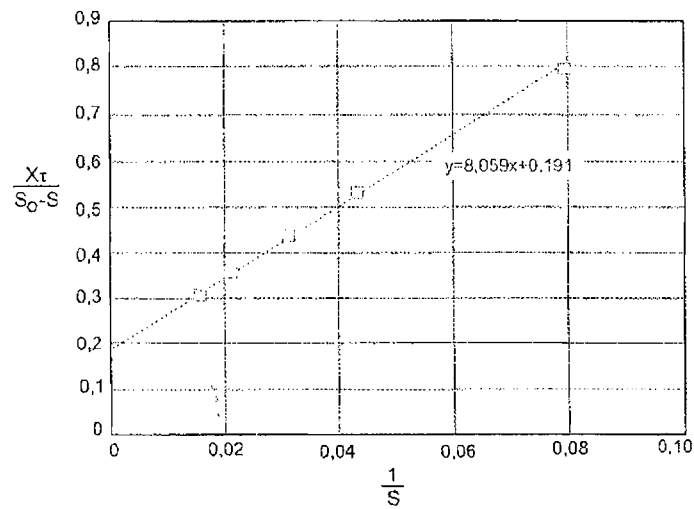
Zadatak 3. Odrediti kinetičke parametre mikrobiološkog rasta, korišćenjem vrednosti datih u tabeli, dobijenih iz šaržnog sistema sa kompletnim mešanjem bez recirkulacije kod koga je ulazna koncentracija zagađenja iznosila 500 mg/L.

S mg/L	$\tau = \theta$ d	X mg/L
13	3,2	123
24	2,0	127
33	1,6	127
49	1,3	124
67	1,1	119

Rešenje:

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$ d	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
487	393,6	0,808	0,077
476	254,0	0,534	0,042
467	203,2	0,435	0,030
451	161,2	0,357	0,020
433	130,9	0,302	0,015



$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,191 \text{ d}$$

$$k = 5,2 \frac{\text{mg}_{\text{sup}}}{\text{mg}_{\text{bio}} \cdot \text{d}}$$

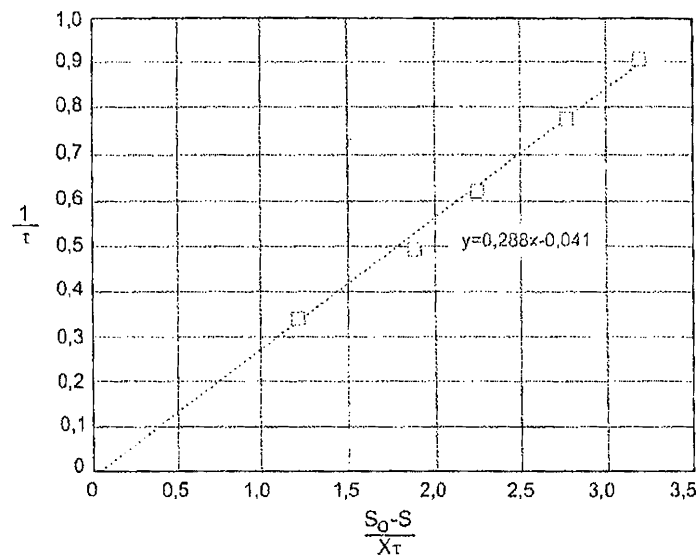
$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = 8,059 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{d}$$

$$K_s = 8,059 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{d} \cdot 5,2 \text{ d}^{-1}$$

$$K_s = 42 \frac{mg}{L}$$

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X\tau} - k_d$$

$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S)}{X\tau}$ d^{-1}
0,313	1,24
0,500	1,87
0,625	2,30
0,769	2,80
0,909	3,31



$$\text{odsečak} = -k_d = -0,041 d^{-1}$$

$$k_d = 0,041 d^{-1}$$

$$\text{nagib} = Y = 0,3$$

$$Y = 0,3 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = kY$$

$$\mu_m = 5,2 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d} \cdot 0,3 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = 1,56 d^{-1}$$

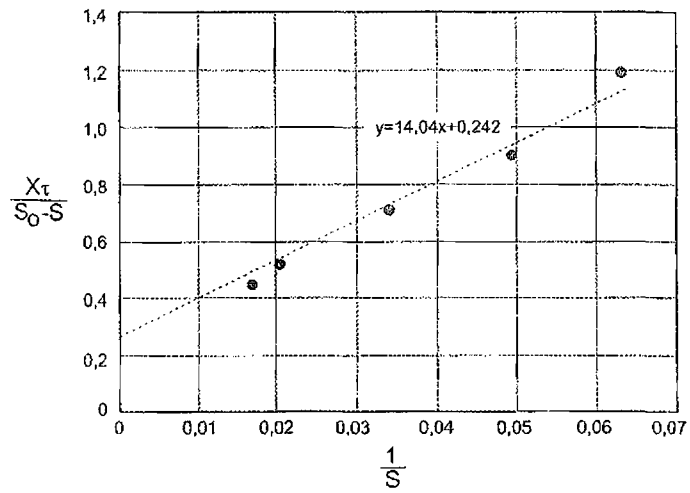
Zadatak 4. Odrediti kinetičke parametre mikrobiološkog rasta, korišćenjem vrednosti datih u tabeli, dobijenih iz šaržnog sistema sa kompletnim mešanjem bez recirkulacije kod koga je ulazna koncentracija zagađenja iznosila 350 mg/L.

S mg/L	$\tau = \theta$ d	X mg/L
16	3,0	133
20	2,0	137
30	1,7	136
50	1,2	134
60	1,1	129

Rešenje:

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$ d	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
334	399	1,19	0,062
330	274	0,830	0,050
320	231,2	0,722	0,033
300	160,8	0,536	0,020
290	141,9	0,489	0,017



$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,242 \text{ d}$$

$$k = 4,13 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d}$$

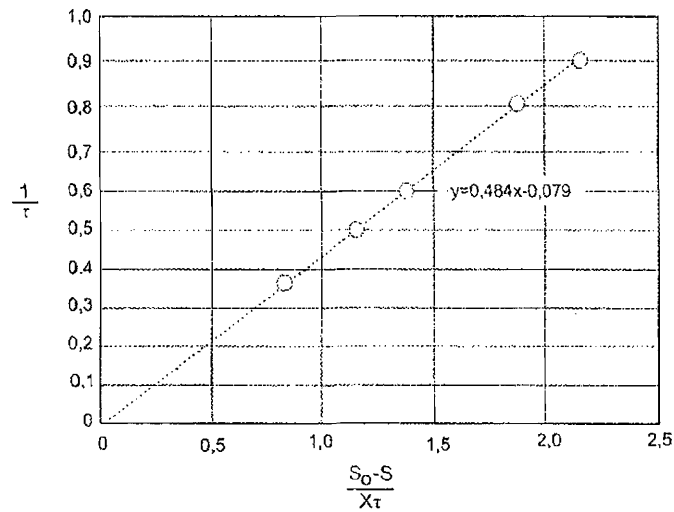
$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = 14,04 \frac{mg}{L} \cdot d$$

$$K_s = 14,04 \frac{mg}{L} \cdot d \cdot 4,13 \text{ d}^{-1}$$

$$K_s = 58 \frac{mg}{L}$$

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X\tau} - k_d$$

$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S)}{X\tau}$ d^{-1}
0,33	0,837
0,50	1,204
0,59	1,384
0,83	1,866
0,91	2,044



$$\text{odsečak} = -k_d = -0,079 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0,079 \text{ d}^{-1}$$

$$\text{nagib} = Y = 0,5$$

$$Y = 0,5 \frac{m_{g_{bio}}}{m_{g_{sup}}}$$

$$\mu_m = kY$$

$$\mu_m = 4,13 \frac{m_{g_{sup}}}{m_{g_{bio}} \cdot d} \cdot 0,5 \frac{m_{g_{bio}}}{m_{g_{sup}}}$$

$$\mu_m = 2,1 \text{ d}^{-1}$$

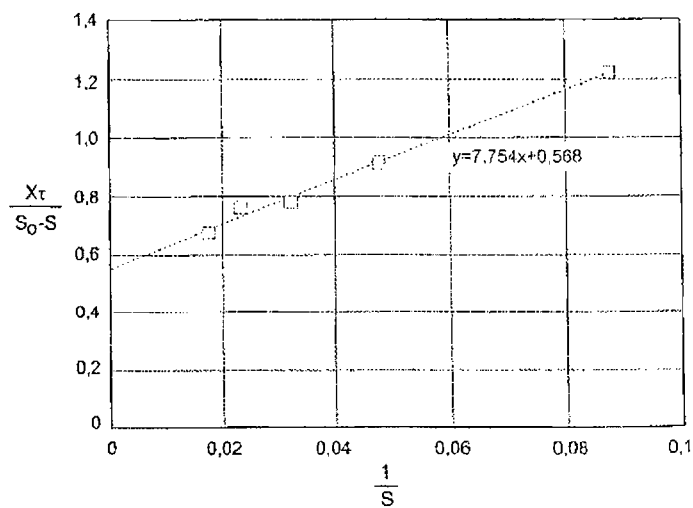
Zadatak 5. Odrediti kinetičke parametre mikrobiološkog rasta, korišćenjem vrednosti datih u tabeli, dobijenih iz šaržnog sistema sa kompletnim mešanjem bez recirkulacije.

S_0 mg/L	S mg/L	$\tau = \theta$ d	X mg/L
340	12	3,2	124
305	24	2,0	128
286	34	1,6	120
240	47	1,3	111
210	50	1,1	105

Rešenje:

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
328	396,8	1,21	0,083
281	256	0,911	0,042
252	192	0,762	0,029
193	144,3	0,748	0,021
160	115,5	0,722	0,020



$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,568 \text{ d}$$

$$k = 1,8 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d}$$

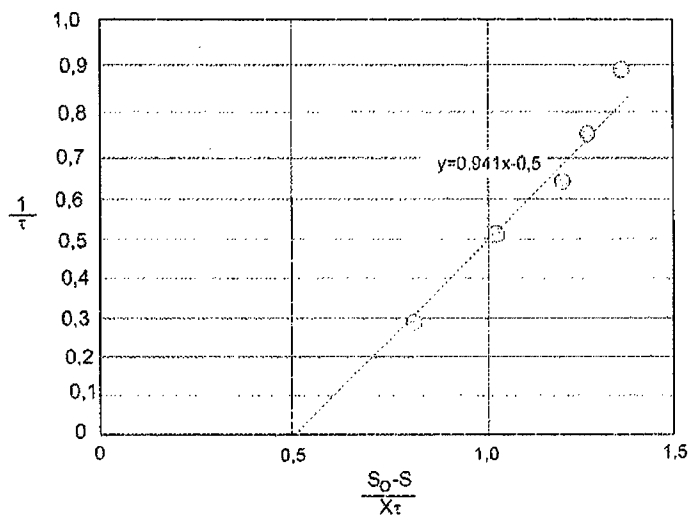
$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = 7,75 \frac{mg}{L} \cdot d$$

$$K_s = 7,75 \frac{mg}{L} \cdot d \cdot 1,8 d^{-1}$$

$$K_s = 14 \text{ mg/L}$$

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X\tau} - k_d$$

$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S)}{X\tau}$ d^{-1}
0,31	0,827
0,50	1,098
0,62	1,312
0,77	1,337
0,91	1,385



$$\text{odsečak} = -k_d = -0,5 d^{-1}$$

$$k_d = 0,5 \text{ d}^{-1}$$

$$n_{agib} = Y = 0,941$$

$$Y = 0,9 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = kY$$

$$\mu_m = 1,8 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio}} \cdot d \cdot 0,9 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = 1,6 \text{ d}^{-1}$$

Zadatak 6. Odrediti kinetičke parametre mikrobiološkog rasta, korišćenjem vrednosti datih u tabeli, dobijenih iz šaržnog sistema sa kompletnim mešanjem bez recirkulacije.

S_0 mg/L	S mg/L	$\tau = \theta$ d	X mg/L
330	15	3,0	124
315	25	2,0	128
290	36	1,6	125
270	48	1,3	122
253	53	1,1	118

Rešenje:

$$\frac{X\tau}{S_0 - S} = \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

$S_0 - S$ mg/L	$X\tau$ mg/L · d	$\frac{X\tau}{S_0 - S}$ d	$\frac{1}{S}$ 1/(mg/L)
315	372	1,18	0,067
290	256	0,88	0,040
254	200	0,79	0,028
222	158,6	0,71	0,021
200	129,8	0,65	0,019

$$\text{odsečak} = \frac{1}{k} = 0,474 \text{ d}$$

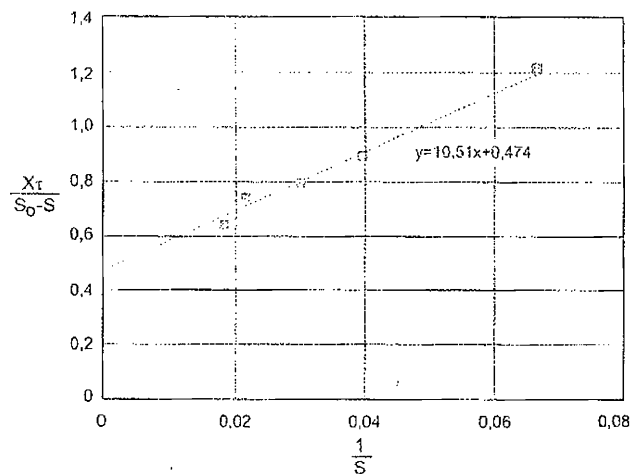
$$k = 2,13 \frac{\text{mg}_{\text{sup}}}{\text{mg}_{\text{bio}} \cdot \text{d}}$$

$$\text{nagib} = \frac{K_s}{k} = 10,51 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{d}$$

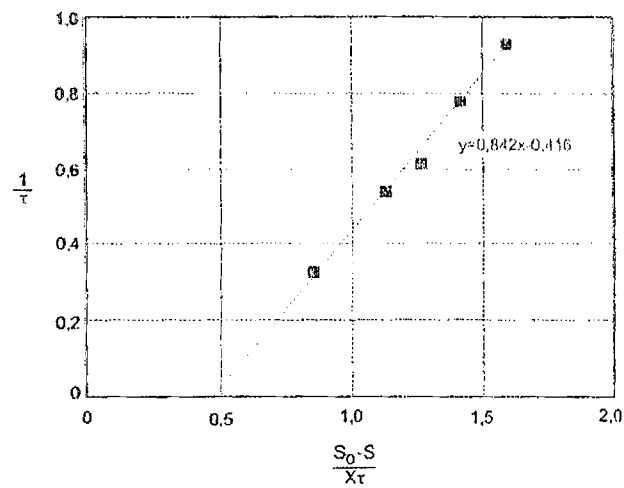
$$K_s = 10,51 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \text{d} \cdot 2,13 \text{d}^{-1}$$

$$K_s = 22,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\frac{1}{\tau} = Y \frac{S_0 - S}{X\tau} - k_d$$



$\frac{1}{\tau}$ d^{-1}	$\frac{(S_0 - S)}{X\tau}$ d^{-1}
0,33	0,847
0,50	1,13
0,62	1,27
0,77	1,40
0,91	1,54



$$\text{odsečak} = -k_d = -0,416 d^{-1}$$

$$k_d = 0,42 d^{-1}$$

$$\text{nagib} = Y = 0,842$$

$$Y = 0,8 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = kY$$

$$\mu_m = 2,13 \frac{mg_{sup}}{mg_{bio} \cdot d} \cdot 0,8 \frac{mg_{bio}}{mg_{sup}}$$

$$\mu_m = 1,7 d^{-1}$$

Zadatak 7. U kontinualno postrojenje sa aktivnim muljem dolazi otpadna voda sa protokom $0,088 \text{ m}^3/\text{s}$ i koncentracijom biorazgradivih zagađujućih materija 300 mg/L . Potrebno je da proces obezbedi 95% konverzije zagađenja. Kinetički parametri ovog procesa su:

$$\mu_m = 0,4 \text{ h}^{-1}, K_s = 75 \text{ mg/L}, k_d = 0,01 \text{ h}^{-1}, Y = 0,6 \text{ mg/mg}$$

Odrediti:

- 1) Koncentraciju biomase na izlazu iz bioreaktora.
- 2) Ukoliko dođe do povećanja ukupne ulazne koncentracije u bioreaktor za 100 mg/L biorazgradivih materija kolika će tada biti potrebna koncentracija biomase u bioreaktoru da bi se izlazna koncentracija održala na konstantnoj vrednosti?
- 3) Ukoliko se zahteva da izlazna koncentracija zagađujućih materija bude 9 mg/L , da li ovo postrojenje može da odgovori ovom zahtevu?

Rešenje:

- 1) Proces obezbeđuje 95% konverzije, pa je izlazna koncentracija zagađujućih materija iz aeracionog bazena jednaka:

$$S = (1 - 0,95) \cdot 300 = 15 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Kombinovanjem jednačina:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X$$

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

$$\tau = \frac{V}{Q_0}$$

moгуće je izračunati vrednosti za koncentraciju biomase u aeracionom bazenu i hidrauličkog vremena zadržavanja:

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - k_d X \tau = 0$$

$$(300 - 15) - \frac{0,4 \cdot 15 \cdot X \cdot \tau}{0,6 \cdot (75 + 15)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,4 \cdot 15 \cdot X \cdot \tau}{(75 + 15)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$285 - 0,11 \cdot X \cdot \tau = 0 \rightarrow X \tau = 2591$$

$$-X + 0,067 \cdot X \cdot \tau - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$-X + 0,067 \cdot 2591 - 0,01 \cdot 2591 = 0$$

$$X = 148 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{2591}{148} = 17,5h$$

2) Koncentracija bionerazgradivih materija ne utiče na koncentraciju mikroorganizama u aeracionom bazenu, tako da će ona ostati nepromenjena i iznosiće 148 mg/L .

3) Na osnovu dobijene vrednosti za hidrauličko vreme zadržavanja, dobija se i vrednost brzine ispiranja mikroorganizama u datom sistemu:

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{17,5h} = 0,057 \text{ h}^{-1}$$

Ukoliko je zahtev da izlazna koncentracija zagađujućih materija bude 9 mg/L , u tom slučaju je brzina rasta mikroorganizama jednaka:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} = 0,4 \cdot \frac{9}{75 + 9} = 0,043 \text{ h}^{-1}$$

Pošto je $D > \mu$ dolazi do ispiranja biomase iz aeracionog bazena, tako da sistem neće moći da odgovori na ovaj zahtev.

Zadatak 8. U kontinualno postrojenje sa aktivnim muljem dolazi otpadna voda sa protokom $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ i koncentracijom biorazgradivih rastvorenih zagađujućih materija 500 mg/L . Potrebno je da proces obezbedi 96% konverzije zagađenja. Kinetički parametri ovog procesa su: $\mu_m = 0,6 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 60 \text{ mg/L}$, $k_d = 0,07 \text{ h}^{-1}$, $Y = 0,5 \text{ mg/mg}$

Izračunati:

- 1) Koncentraciju biomase u reaktoru.
- 2) Pri povećanju protoka za 40% vreme zadržavanja vode u bioreaktoru je smanjeno. Da li pri ovakvim uslovima dolazi do ispiranja biomase iz reaktora?.

Rešenje:

- 1) Izlazna koncentracija supstrata iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = (1 - 0,96) \cdot 500 = 20 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Izračunavanje koncentracije aktivne biomase i hidrauličkog vremena zadržavanja:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - k_d X \tau = 0$$

$$(500 - 20) - \frac{0,6 \cdot 20 \cdot X \cdot \tau}{0,5 \cdot (60 + 20)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,6 \cdot 20 \cdot X \cdot \tau}{(60 + 20)} - 0,07 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$480 - 0,3 \cdot X \tau = 0 \rightarrow X \tau = 1600$$

$$-X + 240 - 112 = 0$$

$$X = 128 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{1600}{128} = 12,5 \text{ h}$$

2) Zapremina aeracionog bazena iznosi:

$$Q = 0,1 \frac{m^3}{s} = 360 \frac{m^3}{h}$$

$$V = Q \cdot t = 360 \cdot 12,5 = 4500 \text{ m}^3$$

Vrednost protoka pri njegovom povećanju od 40% je:

$$Q_n = Q + 0,4 \cdot Q = 360 + 0,4 \cdot 360 = 504 \frac{m^3}{h}$$

Zbog povećane količine vode koju ista zapremina aeracionog bazen treba da primi, vreme zadržavanja će biti smanjeno:

$$t_n = \frac{V}{Q_n} = \frac{4500}{504} = 8,9 \text{ h}$$

Pri promenjenom vremenu zadržavanja, brzina ispiranja biomase iznosi,

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{8,9} = 0,112 \text{ h}^{-1}$$

A vrednost specifične brzine rasta mikroorganizama je:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} = 0,6 \cdot \frac{20}{60 + 20} = 0,15 \text{ h}^{-1}$$

Zbog toga što je zadovoljen uslov rasta, $D < \mu$, ne dolazi do ispiranja biomase.

Zadatak 9. Koncentracija rastvorenog biorazgradivog zagađenja u otpadnoj vodi iznosi 267 mg/L . Potrebno je da biološki proces prečišćavanja obezbedi 90% konverzije zagađenja. Kinetički parametri ovog procesa su: $\mu_m = 0,3 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 100 \text{ mg/L}$, $k_d = 0,01 \text{ h}^{-1}$, $Y = 0,6 \text{ mg/mg}$

Izračunati:

- 1) koncentraciju biomase u bioreaktoru;
- 2) koncentraciju zagađujućih materija na izlazu iz bioreaktora ako se smanji vreme zadržavanja za 35%. Uzeti za ovaj slučaj da je brzina ispiranja jednaka specifičnoj brzini rata mikroorganizama.

Rešenje:

1)

$$S = (1 - 0,90) \cdot 267 = 26,7 \frac{mg}{L}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - k_d X \tau = 0$$

$$(267 - 26,7) - \frac{0,3 \cdot 26,7 \cdot X \cdot \tau}{0,6 \cdot (100 + 26,7)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,3 \cdot 26,7 \cdot X \cdot \tau}{(100 + 26,7)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$240,3 - 0,105 \cdot X \tau = 0 \rightarrow X \tau = 2289$$

$$-X + 144,7 - 22,89 = 0$$

$$X = 122 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{2289}{122} = 18,8 \text{ h}$$

2) Vreme zadržavanja smanjeno za 35% iznosi:

$$\tau_n = \tau - 0,35 \cdot \tau = 18,8 - 0,35 \cdot 18,8 = 12,22 \text{ h}$$

Pri ovom vremenu zadržavanja, bina ispiranja biomase iznosi:

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{12,22} = 0,0818 \text{ h}^{-1}$$

Pošto je minimalno zadovoljen uslov rasta mikroorganizama,

$$\mu = D = 0,0818 \text{ h}^{-1}$$

primenom Monodove jednačine dobija se i vrednost supstrata na izlazu iz aeracionog bazena:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

$$\mu(K_s + S) = \mu_m S$$

$$\mu K_s = S(\mu_m - \mu)$$

$$S = \frac{\mu K_s}{(\mu_m - \mu)}$$

$$S = \frac{0,0818 \cdot 100}{0,3 - 0,0818}$$

$$S = 37,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Zadatak 10. U kontinualno postrojenje sa aktivnim muljem dolazi otpadna voda sa protokom $16000 \text{ m}^3/\text{d}$ i koncentracijom biorazgradivih rastvorenih zagađujućih materija 460 mg/L . Potrebno je da proces obezbedi 95% konverzije zagađenja. Kinetički parametri ovog procesa su: $\mu_m = 0,4 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 85 \text{ mg/L}$, $k_d = 0,01 \text{ h}^{-1}$, $Y = 0,5 \text{ mg/mg}$

Izračunati:

- 1) Koncentraciju biomase u reaktoru.
- 2) Pri povećanju protoka za 55% vreme zadržavanja vode u bioreaktoru je smanjeno. Da li pri ovakvim uslovima dolazi do ispiranja biomase iz reaktora?

Rešenje:

1)

$$S = (1 - 0,95) \cdot 460 = 23 \frac{mg}{L}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - k_d X \tau = 0$$

$$(460 - 23) - \frac{0,4 \cdot 23 \cdot X \cdot \tau}{0,5 \cdot (85 + 23)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,4 \cdot 23 \cdot X \cdot \tau}{(85 + 23)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$437 - 0,170 \cdot X \tau = 0 \rightarrow X \tau = 2571$$

$$-X + 219 - 25,71 = 0$$

$$X = 193,3 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{2571}{193,3} = 13,3 \text{ h}$$

$$Q = 16000 \frac{m^3}{d} = 666,7 \frac{m^3}{h}$$

$$V = Q \cdot t = 666,7 \cdot 13,3 = 8866,7 \text{ m}^3$$

$$Q_n = Q + 0,5 \cdot Q = 666,7 + 0,55 \cdot 666,7 = 1033,4 \frac{m^3}{h}$$

$$t_n = \frac{V}{Q_n} = \frac{8866,7}{1033,4} = 8,6 \text{ h}$$

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{8,6} = 0,116 \text{ h}^{-1}$$

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} = 0,4 \cdot \frac{23}{85 + 23} = 0,085 \text{ h}^{-1}$$

Zbog toga što je $D > \mu$ dolazi do ispiranja biomase.

Zadatak 11. Koncentracija rastvorenog biorazgradivog zagađenja u otpadnoj vodi iznosi 600 mg/L . Potrebno je da biološki proces prečišćavanja obezbedi 95% konverzije zagađenja. Kinetički parametri ovog procesa su: $\mu_m = 0,7 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 40 \text{ mg/L}$, $k_d = 0,1 \text{ h}^{-1}$, $Y = 0,6 \text{ mg/mg}$

Izračunati:

- 1) koncentraciju biomase u bioreaktoru;
- 2) koncentraciju zagađujućih materija na izlazu iz bioreaktora ako se poveća vreme zadržavanja za 40%. Uzeti za ovaj slučaj da je brzina ispiranja jednaka specifičnoj brzini rasta mikroorganizama.

Rešenje:

1)

$$S = (1 - 0,95) \cdot 600 = 30 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - k_d X$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - k_d X \tau = 0$$

$$(600 - 30) - \frac{0,7 \cdot 30 \cdot X \cdot \tau}{0,6 \cdot (40 + 30)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,7 \cdot 30 \cdot X \cdot \tau}{(40 + 30)} - 0,1 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$570 - 0,5 \cdot X\tau = 0 \rightarrow X\tau = 1140$$

$$-X + 342 - 114 = 0$$

$$X = 228 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{1140}{228} = 5,0 \text{ h}$$

2)

$$\tau_n = \tau + 0,40 \cdot \tau = 5 + 0,4 \cdot 5 = 7,0 \text{ h}$$

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{7} = 0,143 \text{ h}^{-1}$$

$$\mu = D = 0,143 \text{ h}^{-1}$$

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

$$\mu(K_s + S) = \mu_m S$$

$$\mu K_s = S(\mu_m - \mu)$$

$$S = \frac{\mu K_s}{(\mu_m - \mu)}$$

$$S = \frac{0,143 \cdot 40}{0,7 - 0,143} = 10,3 \frac{mg}{L}$$

Zadatak 12. U kontinualni bioreaktor koji radi po principu hemostata uvodi se otpadna voda sa protokom 63 L/s i koncentracijom biorazgradivih zagađujućih materija 400 mg/L . Izlazna koncentracija iz bioreaktora je bila 60 mg/L . Kinetički parametri ovog procesa su:

$$\mu_m = 0,4 \text{ h}^{-1}, K_s = 100 \text{ mg/L}, k_d = 0,01 \text{ h}^{-1}, Y = 0,5 \text{ mg/mg}$$

Izračunati sledeće veličine:

1) izlaznu koncentraciju biomase iz bioreaktora;

- 2) zapreminu bioreaktora;
 3) ukupnu količinu biomase u bioreaktoru.

Rešenje:

- 1) Kombinovanjem jednačina:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S - \frac{\mu X}{Y}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_0}{V} X_0 - \frac{Q_0}{V} X + \mu X - \mu_d X$$

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

$$\tau = \frac{V}{Q_0}$$

Izračunava se koncentracija biomase:

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - \mu_d X \tau = 0$$

$$(400 - 60) - \frac{0,4 \cdot 60 \cdot X \cdot \tau}{0,5 \cdot (100 + 60)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,4 \cdot 60 \cdot X \cdot \tau}{(100 + 60)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$340 - 0,3 \cdot X \cdot \tau = 0 \rightarrow X \tau = 1133$$

$$-X + 0,15 \cdot X \cdot \tau - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$-X + 0,15 \cdot 1133 - 0,01 \cdot 1133 = 0$$

$$X = 159 \frac{mg}{L}$$

- 2) Izračunavanje zapremine aeracionog bazena (bioreaktora).

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

$$X\tau = 1133$$

$$\tau = 7,13h$$

$$V = \tau \cdot Q = 7,13h \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 63 \frac{L}{s} = 1617m^3$$

3) Količina biomase u bioreaktoru je jednaka proizvodu zapremine bioreaktora i koncentraciji biomase u njemu:

$$M_X = X \cdot V = 159 \frac{mg}{L} \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \cdot 1617m^3 = 257 kg$$

Zadatak 13. U kontinualni bioreaktor sa idealnim mešanjem se uvodi otpadna voda sa protokom $158 m^3/h$ i koncentracijom zagađenja (limitirajućeg supstrata) $0,5 g/L$. Potrebno je da proces obezbedi 98% konverzije zagađenja pomoću mikroorganizama koji se nalaze u bioreaktoru. Kinetički parametri ovog procesa su:

$$\mu_m = 0,4h^{-1}, K_s = 0,1g/L, k_d = 0,01h^{-1}, Y = 0,5 mg/mg$$

Odrediti:

- 1) koncentraciju biomase na izlazu iz bioreaktora;
- 2) ukupnu količinu biomase u bioreaktoru;
- 3) brzinu razblaženja;
- 4) ukoliko se poveća protok na $245 m^3/h$, proveriti rad sistema pod takvim uslovima.

Rešenje:

- 1) Koncentracija biomase na izlazu i bioreaktora je zapravo ona koncentracija koja se nalazi u bioreaktoru:

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m SX\tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m SX\tau}{K_s + S} - \mu_d X\tau = 0$$

$$(500 - 10) - \frac{0,4 \cdot 10 \cdot X \cdot \tau}{0,5 \cdot (100 + 10)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,4 \cdot 10 \cdot X \cdot \tau}{(100 + 10)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$490 - 0,0727 \cdot X \cdot \tau = 0 \rightarrow X \cdot \tau = 6740$$

$$-X + 0,036 \cdot X \cdot \tau - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$-X + 0,036 \cdot 6740 - 0,01 \cdot 6740 = 0$$

$$X = 175 \frac{mg}{L}$$

2)

$$\tau = \frac{6740}{175} = 38,5 \text{ h}$$

$$V = \tau \cdot Q = 38,5 \text{ h} \cdot 158 \frac{m^3}{h} = 6085 m^3$$

$$M_x = X \cdot V = 175 \frac{mg}{l} \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \cdot 6085 m^3 = 1065 \text{ kg}$$

3)

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{38,5} = 0,026 h^{-1}$$

Provera uslova za rast biomase u bioreaktoru:

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} = 0,4 \cdot \frac{10}{100 + 10} = 0,036 h^{-1}$$

$$D < \mu$$

4)

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{6085 m^3}{245 \frac{m^3}{d}} = 24,8 \text{ h}$$

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{24,8} = 0,040 h^{-1}$$

$$D > \mu$$

Pri uslovima povećanog protoka, sistem neće raditi adekvatno jer dolazi do spiranja biomase iz sistema.

Zadatak 14. Protok otpadne vode iznosi $312 \text{ m}^3/\text{h}$. Koncentracije konstituenata otpadne vode su date u tabeli. Izračunati zapreminu bioreaktora kao i potrebnu koncentraciju mikroorganizama u bioreaktoru da bi se izvršila konverzija od 95% ulaznog zagađenja. Pretpostaviti da se uklanja samo rastvoreni biorazgradivi COD.

Konstituenti	mg/L
COD	650
sCOD	210
bpCOD	580
nbpCOD	322

Podaci: $\mu_m = 0,5 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 0,1 \frac{\text{g}}{\text{L}}$, $Y = 0,6 \frac{\text{mg}}{\text{mg}}$, $k_d = 0,01 \text{ h}^{-1}$

Rešenje:

$$pCOD = COD - sCOD = 650 - 210 = 440 \text{ mg/L}$$

$$pCOD = bpCOD + nbpCOD$$

$$sbCOD = 440 - 322 = 119 \text{ mg/L}$$

$$bsCOD = bCOD - sbCOD$$

$$bsCOD = 580 - 119 = 461 \text{ mg/L}$$

$$S = (1 - 0,95)S_0 = (1 - 0,95) \cdot 461 = 23,05 \text{ mg/L}$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m SX\tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m SX\tau}{K_s + S} - \mu_d X\tau = 0$$

$$(461 - 23,05) - \frac{0,5 \cdot 23,05 \cdot X\tau}{0,6 \cdot (100 + 23,05)} = 0$$

$$-X + \frac{0,5 \cdot 23,05 \cdot X\tau}{100 + 23,05} - 0,01 \cdot X\tau = 0$$

$$437,95 - 0,156 \cdot X\tau = 0 \rightarrow X\tau = 2807$$

$$-X + 0,0937 \cdot X\tau - 0,01 \cdot X\tau = 0$$

$$-X + 0,0937 \cdot 2807 - 0,01 \cdot 2807 = 0$$

$$X = 207,95 \frac{mg}{L}$$

$$\tau = \frac{2807}{207,95} = 13,5 \text{ h}$$

$$V = Q \cdot t = 312 \cdot 13,5 = 4213 \text{ m}^3$$

Zadatak 15. U kontinualni bioreaktor sa idealnim mešanjem se uvodi otpadna voda sa protokom $700 \text{ m}^3/\text{h}$. Proces obezbeđuje 92% konverzije zagađenja pomoću mikroorganizama koji se nalaze u bioreaktoru, pa je koncentracija zagađujućih materija na izlazu iz bioreaktora jednaka $0,03 \text{ g/L}$. Kinetički parametri ovog procesa su:

$$\mu_m = 0,6 \text{ h}^{-1}, K_s = 0,1 \text{ g/L}, k_d = 0,02 \text{ h}^{-1}, Y = 0,5 \text{ mg/mg}$$

Odrediti:

- 1) koncentraciju biomase na izlazu iz bioreaktora;
- 2) ukupnu količinu biomase u bioreaktoru;
- 3) brzinu razblaženja;
- 4) ukoliko se poveća protok na $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, proveriti da li dolazi do spiranja biomase.

Rešenje:

1)

$$S = 0,03 \frac{g}{L} = 30 \frac{mg}{L}$$

$$S_0 = \frac{S}{(1 - 0,92)} = \frac{30}{(1 - 0,92)} = 375 \frac{mg}{L}$$

$$K_s = 0,1 \frac{g}{L} = 100 \frac{mg}{L}$$

$$(S_0 - S) - \frac{\mu_m S X \tau}{Y(K_s + S)} = 0$$

$$(X_0 - X) + \frac{\mu_m S X \tau}{K_s + S} - \mu_d X \tau = 0$$

$$(375 - 30) - \frac{0,6 \cdot 30 \cdot X \cdot \tau}{0,5 \cdot (100 + 30)} = 0$$

$$(0 - X) + \frac{0,6 \cdot 30 \cdot X \cdot \tau}{(100 + 30)} - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$345 - 0,277 \cdot X \cdot \tau = 0 \rightarrow X \cdot \tau = 1245,5$$

$$-X + 0,138 \cdot X \cdot \tau - 0,01 \cdot X \cdot \tau = 0$$

$$-X + 0,092 \cdot 1245,5 - 0,01 \cdot 1245,5 = 0$$

$$X = 102,1 \frac{mg}{L}$$

2)

$$\tau = \frac{1245,5}{102,1} = 12,2 \text{ h}$$

$$V = \tau \cdot Q = 12,2 \text{ h} \cdot 700 \frac{m^3}{h} = 8540 \text{ m}^3$$

$$M_X = X \cdot V = 102,1 \frac{mg}{L} \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \cdot 8540 \text{ m}^3 = 871,9 \text{ kg}$$

3)

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{12,2} = 0,082 \text{ h}^{-1}$$

4)

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{8540 \text{ m}^3}{1000 \frac{m^3}{h}} = 8,54 \text{ h}$$

$$D = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{8,54} = 0,117 \text{ h}^{-1}$$

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} = 0,6 \cdot \frac{30}{100 + 30} = 0,138 \text{ h}^{-1}$$

$$D < \mu$$

Pri povećanju protoka ne dolazi do ispiranja biomase iz sistema.

Aktivni mulj

Zadatak 1. Proces sa aktivnim muljem, kompletnim mešanjem i recirkulacijom, tretira komunalnu otpadnu vodu sa koncentracijom BOD_5 nakon primarnog taložnika od 135 mg/L . Aeracioni bazen sadrži 3000 mg/L aktivne biomase. Nakon aeracionog bazena koncentracija BOD_5 je iznosila 10 mg/L BOD_5 , a suspendovanih materija 15 mg/L . Suspendovane materije sadrže BOD_5 u odnosu $0,5 \text{ mg } BOD_5/\text{mg}$ suspendovanih materija. Kinetički parametri ovog procesa su $\mu_m = 3,0 \text{ d}^{-1}$, $K_s = 60 \text{ mg/L}$, $k_d = 0,06 \text{ d}^{-1}$, $Y = 0,60 \text{ mg/mg } BOD_5$. Izračunati hidrauličko vreme zadržavanja.

Rešenje:

Bilans za sistem sa recirkulacijom:

$$\frac{dX}{dt}V = Q_0X_0 - (Q_eX_e + Q_wX_r) + V\mu X - Vk_dX$$

$$\frac{dX}{dt} = 0; \quad X_0 = 0$$

$$V\mu X = (Q_eX_e + Q_wX_r) + Vk_dX$$

Deljenjem bilansa za biomasu sa XV dobija se:

$$\mu = \frac{(Q_eX_e + Q_wX_r)}{VX} + k_d$$

$$\mu = \frac{1}{\theta} + k_d$$

$$\frac{1}{\theta} = \mu_m \frac{S}{K_s + S} - k_d$$

U efluentu biološkog tretmana, nakon sekundarnog taložnika, nalaze se samo preostale zagađujuće materije koje su rastvorene,

$$S = \text{rastvoreni } BOD_5$$

Sve partikulativne suspendovane materije se talože u sekundarnom taložniku. Vrednost BOD_5 u sebi sadrži i

rastvoreni i partikulativni deo, pa je potrebno od ukupne vrednosti BOD_5 oduzeti partikulativni deo, da bi se dobio rastvoreni deo BOD_5 koji nije uklonjen i koji se nalazi u efluentu biološkog tretmana.

$$S = 10 - (0,5 \cdot 15) = 2,5 \frac{mg}{L}$$

Zamenom vrednosti dobija se vreme zadržavanja ćelija u aeracionom bazenu:

$$\frac{1}{\theta} = 3 \cdot \left(\frac{2,5}{60 + 2,5} \right) - 0,06$$

$$\theta = 16,7 d$$

Pomoću jednačine za izračunavanje koncentracije aktivne biomase u sistemu sa recirkulacijom, dobija se hidrauličko vreme zadržavanja:

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau (1 + k_d \theta)}$$

$$\tau = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{X (1 + k_d \theta)}$$

$$\tau = \frac{16,7 \cdot 0,6(135 - 2,5)}{3000 \cdot 1 + 0,06 \cdot 16,7}$$

$$\tau = 0,2211d = 5,31 h$$

Zadatak 2. Otpadna voda koja dolazi na postrojenje ima koncentraciju $sCOD$ 295 mg/L i $pCOD$ od 190 mg/L. Primarnim taloženjem se uklanja 30% taloživih materija. Nakon primarnog taloženja otpadna voda ulazi u aeracioni bazen sa aktivnim muljem bez recirkulacije. U aeracionom bazenu vrši se konverzija rastvorenih biorazgradivih organskih materija od 90%, pa koncentracija COD na izlazu iz aeracionog bazena iznosi 234,5 mg/L. Hidrauličko vreme zadržavanja u aeracionom bazenu je 5 h. Prinos biomase po utrošenom supstratu je 0,6 mg/mg, a koeficijent odumiranja 0,06 d^{-1} . Odrediti koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu.

Rešenje:

Ulaz u postrojenje:

$$sCOD = 295 \text{ mg/L}$$

$$pCOD = 190 \text{ mg/L}$$

$$COD = sCOD + pCOD = 295 + 190 = 485 \text{ mg/L}$$

Primarnim taloženjem se uklanja 30% taloživih materija odnosno, 30% partikulativnog COD , dok rastvoreni COD ostaje nepromenjen, pa su koncentracije konstituenata otpadne vode u efluentu primarnog taloženja, a na ulazu u sekundarni tretman, jednake:

$$190:100 = x:30$$

$$x = 57 \text{ mg/L}$$

$$pCOD = 190 - 57 = 133 \text{ mg/L}$$

$$sCOD = 295 \text{ mg/L}$$

$$COD = sCOD + pCOD = 295 + 133 = 428 \text{ mg/L}$$

Na izlazu iz aeracionog bazena koncentracija COD je:

$$COD_{iz} = 234,5 \text{ mg/L}$$

U aeracionom bazenu se uklanja samo rastvoreni biorazgradivi organski materijal, pa je:

$$\begin{aligned} COD_{uklonjeno} &= COD_{ul} - COD_{iz} = 485 - 234,5 \\ &= 193,5 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$bsCOD = 193,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \rightarrow 90\%$$

U ovom slučaju biološkog tretmana se uklanja samo 90% rastvorenih biorazgradivih organskih materija, jer se ne vrši recirkulacija mulja u aeracioni bazen, što ne daje dovoljno vremena da hidrolizuje deo patikulativnog zagađenja koji je biorazgradiv.

Koncentracija *bsCOD* materija na ulazu u aeracioni bazen iznosi:

$$193,5:90 = x:100$$

$$x = 215 \text{ mg/L}$$

$$S_0 = \text{bsCOD} = 215 \text{ mg/L}$$

Na osnovu dobijene vrednosti ulaznog supstrata S_0 (*bsCOD*) može se izračunati koncentracija supstrata na izlazu iz aeracionog bazena:

$$S = (1 - 0,90) \cdot S_0 = (1 - 0,90) \cdot 215 = 21,5 \text{ mg/L}$$

Jednačina za izračunavanje koncentracije aktivne biomase u aeracionom bazenu bez recirkulacije glasi:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \tau}$$

pa se dobija:

$$\tau = \frac{5h}{24} = 0,208 \text{ d}$$

$$X = \frac{0,6 \cdot (215 - 21,5)}{1 + 0,06 \cdot 0,208}$$

$$X = 114,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Zadatak 3. Protok otpadne vode i recirkulacionog toka na ulazu u aeracioni bazen iznosi $19500 \text{ m}^3/\text{d}$. Otpadna voda sadrži *bCOD* od 215 mg/L i *bpCOD* od 105 mg/L . U aeracionom bazenu sa recirkulacijom, zapremine 4875 m^3 , nalazi se 2800 mg/L MLVSS . Bionerazgradivi deo (*nbVSS*) čini 25% *MLVSS*-a. Biološkom obradom se vrši konverzija zagađenja od 90%. Koeficijent prinosa biomase po utrošenom supstratu iznosi $0,6 \text{ mg/mg}$, a koeficijent odumiranja biomase je $0,1 \text{ d}^{-1}$. Odrediti koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu kao i njihovo vreme zadržavanja u njemu.

Rešenje:

Bionerazgradivi deo ($nbVSS$), u koji spadaju ćelijski ostaci i bionerazgradive organske materije koje dolaze sa influentom, čini 25% $MLVSS$, a to je koncentracija od:

$$nbVSS = 0,25 \cdot 2800 = 700 \text{ mg/L}$$

Pored $nbVSS$, $MLVSS$ čini i aktivna biomasa, pa se dobija da je njena vrednost:

$$X = X_{MLVSS} - nbVSS = 2800 - 700 = 2100 \text{ mg/L}$$

Data vrednost protoka na ulazu u aeracioni bazen u sebi sadrži protok otpadne vode i protok recirkulisanog mulja, pa se za izračunavanje hidrauličkog vremena zadržavanja može koristiti jednačina:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{4875 \text{ m}^3}{19500 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,25 \text{ d} = 6 \text{ h}$$

Zagađujuće materije koje predstavljaju supstrat za biomasu su materije koje su dostupne bakterijama. To su pre svega biorazgradive materije koje se nalaze u rastvorenom stanju, ali i partikulativne biorazgradive materije koje zbog recirkulacije, odnosno dovoljno dugog vremena zadržavanja suspendovanih materija u aeracionom bazenu, uspevaju da pomoću ekstracelularnih enzima bakterija, hidrolizuju i postanu dostupne kao supstrat. Na taj način je ukupna količina supstrata jednaka:

$$S_0 = bCOD + bpCOD = 215 + 105 = 320 \text{ mg/L}$$

Zbog efikasnosti uklanjanja ovih materija u aeracionom bazenu od 90%, njihova vrednost na izlazu iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = (1 - 0,90) \cdot 320 = 32 \text{ mg/L}$$

Zamenom poznatih vrednosti u jednačinu za izračunavanje koncentracije biomase u aeracionom bazenu sa recirkulacijom dobija se i tražena vrednost vremena zadržavanja biomase u aeracionom bazenu:

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau(1 + k_d \theta)}$$

$$2100 = \frac{\theta}{0,25} \cdot \frac{0,6(320 - 32)}{(1 + 0,1 \cdot \theta)}$$

$$3,04 = \theta \cdot \frac{1}{1 + 0,1 \cdot \theta}$$

$$3,04 + 0,304 \cdot \theta = \theta$$

$$3,04 = \theta \cdot (1 - 0,304)$$

$$\theta = 4,4 \text{ d}$$

Zadatak 4. Biološka obrada se sastoji od aeracionog bazena i sekundarnog taložnika. Iz taložnika se deo mulja odbacuje sa protokom od $703,7 \text{ m}^3/\text{d}$, a deo se recirkuliše u taložnik. Recirkulacioni odnos je jednak 0,6. Zapremina aeracionog bazena je 5630 m^3 . Vreme zadržavanja ćelija u aeracionom bazenu je 4 dana, a hidrauličko vreme 5 h. U bazenu koncentracija *MLSS* iznosi 3000 mg/L , a *MLVSS* čini 75% *MLSS*. Odnos *F/M* iznosi $0,33 \text{ g/g} \cdot \text{d}$, a ulazna koncentracija zagađujućih biorazgradivih rastvorenih materija je 119 g bsCOD/m^3 . Izračunati:

- 1) koncentraciju *MLSS* u recirkulacionoj struji;
- 2) procentualnu zastupljenost aktivne biomase i *nbVSS*-a u *MLVSS*-u u aeracionom bazenu.

Rešenje:

- 1) Na osnovu jednačine za izračunavanje vremena zadržavanja ćelija u aeracionom bazenu, može se izračunati koncentracija *MLSS* koja se iz sekundarnog taložnika vraća u aeracioni bazen:

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r + Q_e X_e}$$

$$X_e = 0$$

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r}$$

Koncentracija X_r , predstavlja koncentraciju $MLSS$ u recirkulacionoj struji, jer se iz sekundarnog taložnika vraća određena količina svih istaloženih suspednovanih materija, pa se koncentracija X u jednačini ne odnosi na koncentraciju aktivne biomase već na koncentraciju $MLSS$ u aeracionom bazenu:

$$X_{MLSSr} = \frac{V X_{MLSS}}{\theta Q_w}$$

$$X_{MLSSr} = \frac{5630 \text{ m}^3 \cdot 3000 \frac{\text{mgMLSS}}{\text{l}}}{4 \text{ d} \cdot 703,7 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}$$

$$X_{MLSSr} = 6000 \frac{\text{mg MLSS}}{\text{l}}$$

2) U aeracionom bazenu koncentracija $MLVSS$ čini 75% koncentracije $MLSS$:

$$X_{MLVSS} = 0,75 X_{MLSS} = 0,75 \cdot 3000 = 2250 \text{ mg/L}$$

Iz odnosa F/M , dobija se koncentracija aktivne biomase u aeracionom bazenu:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\tau X}$$

$$X = \frac{S_0}{\tau F/M}$$

$$X = \frac{119 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{0,208 \text{ d} \cdot 0,33 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}}$$

$$X = 1734 \frac{\text{g biomase}}{\text{m}^3}$$

pa udeli biomase i $nbVSS$ u $MLVSS$ iznose:

$$f(\text{biomase}) = \frac{1734}{2250} \cdot 100 = 77\%$$

$$f(nbVSS) = 100 - 77 = 23 \%$$

Zadatak 5. Biološko prečišćavanje u postrojenju za tretman otpadnih voda je zasnovano na korišćenju aktivnog mulja sa recirkulacijom. Otpadna voda na postrojenje za tretman pristiže protokom od $22464 \text{ m}^3/\text{d}$. Koncentracija zagađujućih materija u otpadnoj vodi iznosi $76 \text{ g nbCOD}/\text{m}^3$, $300 \text{ g } \frac{\text{COD}}{\text{m}^3}$, $20 \text{ g } \frac{\text{nbCOD}}{\text{m}^3}$ i $10 \text{ g iTSS}/\text{m}^3$.

Koncentracija *MLSS* u aeracionom bazenu je $3000 \text{ g}/\text{m}^3$, a u recirkulacionoj struji koncentracija *MLSS* iznosi $8000 \text{ g}/\text{m}^3$. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 5 dana. Dubina vode u aeracionom bazenu je $4,9 \text{ m}$. Difuzeri su postavljeni na $0,5 \text{ m}$ od dna bazena. Zahtevana koncentracija rastvorenog kiseonika u aeracionom bazenu je $2 \text{ mg}/\text{L}$. Temperatura otpadne vode je $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Korišćeni faktor α iznosi $0,5$. Koncentracija zasićenja kiseonikom na sredini visine aeracionog bazena, C_m je $7,8 \text{ mg}/\text{L}$.

Podaci: $k = 8,75 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$, $Y = 0,4 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,088 \text{ d}^{-1}$, $K_s = 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, $f_d = 0,14 \frac{\text{g}}{\text{g}}$

Određiti:

- 1) dnevnu produkciju organskog dela mulja i produkciju ukupnog mulja;
- 2) masu *MLSS* i *MLVSS* u aeracionom bazenu;
- 3) zapreminu aeracionog bazena i hidrauličko vreme zadržavanja;
- 4) količinu potrebnog kiseonika;
- 5) broj potrebnih difuzera ako je protok vazduha kroz jedan difuzer $0,425 \text{ m}^3/\text{min}$, karakteristike difuzera su date jednačinom;

$$N = 0,04233 Q^{0,9} H_D^{0,67} (C_m - C_L) \cdot 1,02^{(T-20)} \cdot \alpha$$
- 6) količinu potrebnog vazduha za aeraciju.

Rešenje:

- 1) Produkcija organskog dela mulja se izračunava primenom jednačine,

$$P_{X,VSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + QX_{o,i}$$

a produkcija ukupnog mulja:

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + QX_{o,i} + Q(iTSS)$$

Za izračunavanje ovih vrednosti podaci koji nedostaju su vrednosti koncentracija zagađujućih materija na ulazu i izlazu iz aeracionog bazena. Supstrat, odnosno zagađujuće materije koje bakterije mogu da uklone iz otpadne vode su isključivo one koje su biorazgradive, pa se ulazna koncentracija biorazgradivih materija, $bCOD$, dobija oduzimanjem bionerazgradivih materija, $nbCOD$, od ukupne vrednosti zagađujućih materija COD :

$$S_0 = bCOD = COD - nbCOD$$

$$S_0 = 300 \frac{g}{m^3} - 76 \frac{g}{m^3} = 224 \frac{g \text{ } bCOD}{m^3}$$

U sistemu sa recirkulacijom izlazna koncentracija biorazgradivih materija iz bioreaktora koje bakterije nisu uklonile, se dobija primenom jednačine:

$$S = \frac{K_s[1 + k_d\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1} = \frac{20 \cdot [1 + 0,088 \cdot 5]}{5(0,4 \cdot 8,75 - 0,088) - 1} \\ = 1,8 \frac{g \text{ } bCOD}{m^3}$$

Zamenom vrednosti u jednačine dobijaju se i odgovarajuće produkcije mulja:

$$P_{X,VSS} = \frac{22464 \cdot 0,4 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,088 \cdot 5} + \frac{0,15 \cdot 0,088 \cdot 22464 \cdot 0,4 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} \cdot 5}{1 + 0,088 \cdot 5} + 22464 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 1386,5 + 91,5 + 449,3 = 1927 \frac{kg \text{ } VSS}{d}$$

$$P_{X,TSS} = 1386,5 \cdot \frac{1}{0,85} + 91,5 \cdot \frac{1}{0,85} + 449,3 + 22464 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2413 \frac{kg \text{ } TSS}{d}$$

2) Mase $MLVSS$ i $MLSS$ u aeracionom bazenu se izračunavaju korišćenjem jednačina:

$$X_{MLSS} \cdot V = P_{X,TSS} \cdot \theta = M_{MLSS}$$

$$X_{MLVSS} \cdot V = P_{X,VSS} \cdot \theta = M_{MLVSS}$$

$$M_{MLSS} = 2413 \frac{kg}{d} \cdot 5d = 12065 kg$$

$$M_{MLVSS} = 1927 \frac{kg}{d} \cdot 5d = 9635 kg$$

3) Primenom jednačina korišćenih pod 2) izračunava se i potrebna zapremina aeracionog bazena:

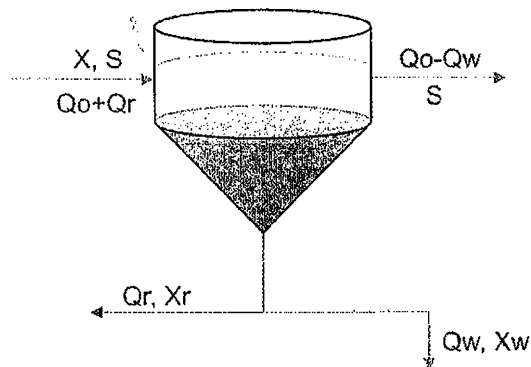
$$X_{MLSS} \cdot V = M_{MLSS}$$

$$V = \frac{M_{MLSS}}{X_{MLSS}} = \frac{12065 kg \cdot 10^3 \frac{g}{kg}}{3000 \frac{g}{m^3}} = 4022 m^3$$

Zbog vršenja recirkulacije, potrebno je pri izračunavanju hidrauličkog vremena zadržavanja pored količine otpadne vode koja pristiže na postrojenja uzeti u obzir i količinu vode koja se recirkuliše nazad u bazen. Pa jednačina za izračunavanje τ , izgleda:

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

Recirkulacioni protok se izračunava iz bilansne jednačine za sekundarni taložnik uz pretpostavku da se količina otpadnog mulja iz taložnika može zanemariti:



$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$Q_r = \frac{QX}{X_r - X} = \frac{22464 \frac{m^3}{d} \cdot 3000 \frac{g}{m^3}}{8000 \frac{g}{m^3} - 3000 \frac{g}{m^3}} = 13478 \frac{m^3}{d}$$

Tražena vrednost hidrauličkog vremena zadržavanja je:

$$\tau = \frac{4022m^3}{22464 \frac{m^3}{d} + 13478 \frac{m^3}{d}} = 0,11 d$$

4) Količina kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen da bi se izvršila potrebna konverzija zagađenja se računa primenom jednačine:

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{X,bio}$$

Produkcija biomase, $P_{X,bio}$, koju čine količina nastale biomase i količina nastalih ćelijskih ostataka u toku dana, se računa:

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

Zbog uočavanja razlike između $P_{X,VSS}$ i $P_{X,bio}$, koju čini član koji predstavlja količinu bionerazgradivih materija koje dolaze sa influentom, $P_{X,bio}$ se može izračunati i na sledeći način:

$$P_{X,bio} = P_{X,VSS} - QX_{0,t} = 1927 - 449,3 = 1478 \frac{kg}{d}$$

pa potrebna količina kiseonika iznosi:

$$R_0 = 22464 \frac{m^3}{d} (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} \frac{kg \text{ bCOD}}{m^3} - 1,42 \cdot 1478 \frac{kg}{d} = 2893 \frac{kg O_2}{d}$$

5) Brzina prenosa kiseonika kroz difuzer, N , data je jednačinom:

$$N = 0,04233 \cdot Q^{0,9} \cdot H_D^{0,67} \cdot (C_m - C_L) \cdot 1,02^{T-20} \cdot \alpha$$

Visina na kojoj su postavljeni difuzeri, gledano od vrha aeracionog bazena je:

$$H_D = H - h = 4,9 m - 0,5 m = 4,4 m$$

$$Q_r = \frac{QX}{X_r - X} = \frac{22464 \frac{m^3}{d} \cdot 3000 \frac{g}{m^3}}{8000 \frac{g}{m^3} - 3000 \frac{g}{m^3}} = 13478 \frac{m^3}{d}$$

Tražena vrednost hidrauličkog vremena zadržavanja je:

$$\tau = \frac{4022m^3}{22464 \frac{m^3}{d} + 13478 \frac{m^3}{d}} = 0,11 d$$

4) Količina kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen da bi se izvršila potrebna konverzija zagađenja se računa primenom jednačine:

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

Produkcija biomase, $P_{x,bio}$, koju čine količina nastale biomase i količina nastalih ćelijskih ostataka u toku dana, se računa:

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

Zbog uočavanja razlike između $P_{x,vss}$ i $P_{x,bio}$, koju čini član koji predstavlja količinu bionerazgradivih materija koje dolaze sa influentom, $P_{x,bio}$ se može izračunati i na sledeći način:

$$P_{x,bio} = P_{x,vss} - QX_{o,l} = 1927 - 449,3 = 1478 \frac{kg}{d}$$

pa potrebna količina kiseonika iznosi:

$$R_0 = 22464 \frac{m^3}{d} (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} \frac{kg \text{ bCOD}}{m^3} - 1,42 \cdot 1478 \frac{kg}{d} = 2893 \frac{kg O_2}{d}$$

5) Brzina prenosa kiseonika kroz difuzer, N , data je jednačinom:

$$N = 0,04233 \cdot Q^{0,9} \cdot H_D^{0,67} \cdot (C_m - C_L) \cdot 1,02^{T-20} \cdot \alpha$$

Visina na kojoj su postavljeni difuzeri, gledano od vrha aeracionog bazena je:

$$H_D = H - h = 4,9 m - 0,5 m = 4,4 m$$

Rešenje:

- 1) Nakon primarnog taloženja koncentracija rastvorenih materija ostaje nepromenjena:

$$bsCOD = 185 \frac{g}{m^3}$$

Čestice koje čine *iTSS* se talože sa efikasnošću od 93%, a količina koja se nije istaložila ostaje u vodi nakon taložnika i ona iznosi:

$$iTSS = (1 - 0,93) \cdot 120 = 8,4 \frac{g}{m^3}$$

Koncentracija *nbpCOD* na izlazu iz taložnika se dobija računanjem efikasnosti taloženja ove vrste zagađenja na osnovu visine sa koje se talože u taložniku:

$$V = Q \cdot t = 8550 \frac{m^3}{d} \cdot 0,0833d = 712,5 m^3$$

$$H = \frac{V}{W \cdot L} = \frac{712,5}{7 \cdot 28} = 3,6 m$$

$$\eta = \frac{h}{H} = \frac{2}{3,6} = 0,55 \rightarrow 55\%$$

$$nbpCOD = (1 - 0,55) \cdot 78 = 35,1 \frac{g}{m^3}$$

- 2) Za izračunavanje koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu, potrebno je prvo izračunati koncentraciju *MLVSS*. Koncentracija *MLVSS* u aeracionom bazenu se izračunava primenom jednačine:

$$MLVSS = X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

Vrednosti parametara koji figurišu u jednačini su sledeće:

$$X_{o,i} = nbVSS_i = nbpCOD = 35,1 \frac{g}{m^3}$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{80 \cdot (1 + 7 \cdot 0,1)}{7 \cdot (0,6 \cdot 9 - 0,1) - 1}$$

$$S = 3,8 \frac{gbsCOD}{m^3}$$

$$X = \frac{\theta \cdot Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]}$$

$$X = \frac{7}{0,208} \cdot \frac{0,6 \cdot (186 - 3,8)}{(1 + 0,1 \cdot 7)}$$

$$X = 2164 \frac{g}{m^3}$$

Pa se dobija da je vrednost $MLVSS$ u aeracionom bazenu:

$$X_{MLVSS} = 2164 + 0,15 \cdot 0,1 \cdot 2164 \cdot 7 + \frac{35,1 \cdot 7}{0,208}$$

$$X_{MLVSS} = 3572 \frac{g}{m^3}$$

Razlika između vrednosti $MLSS$ i $MLVSS$ je u količini inertnih materija koje zaostaju nakon primarnog taložnika i ulaze u aeracioni bazen, pa koncentracija $MLSS$ iznosi:

$$MLSS = MLVSS + iTSS = 3572 + 8,4 = 3580 \frac{g}{m^3}$$

Pošto je koncentracija $MLSS$ u recirkulacionom toku veća 2,5 puta od koncentracije $MLSS$ u aeracionom bazenu, dobija se i njena vrednost:

$$X_{MLSSr} = 2,5 \cdot X_{MLSS} = 2,5 \cdot 3580 = 8950 \frac{g}{m^3}$$

3) Protok recirkulacionog mulja se dobija primenom bilansa za sekundarni taložnik:

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$Q_r = \frac{XQ}{X_r - X}$$

$$Q_r = \frac{3580 \cdot 8550}{8950 - 3580}$$

$$Q_r = 5700 \frac{m^3}{d}$$

- 4) Količina mulja koja se dnevno odbacuje iz sistema se dobija iz jednačine za izračunavanje vremena zadržavanja biomase, suspendovanih materija, u aeracionom bazenu:

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r + Q_e X_e}$$

$$X_e = 0$$

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$V = \tau(Q + Q_r)$$

$$V = 0,208d \cdot (8550 + 5700) \frac{m^3}{d}$$

$$V = 2964 m^3$$

$$Q_w = \frac{VX}{\theta X_r}$$

$$Q_w = \frac{2964 \cdot 3580}{7 \cdot 8950}$$

$$Q_w = 169,4 \frac{m^3}{d}$$

Zadatak 7. Pre aeracionog bazena sa aktivnim muljem komunalna otpadna voda prolazi kroz primarni taložnik pravougaonog oblika, širine 6 m i dubine 3,5 m, brzinom od 0,05 m/s. Ulazna koncentracija zagađujućih organskih materija u primarni taložnik iznosi 520 g bCOD/m³ i 212 bsCOD/m³. Organske partikulativne materije se talože sa visine od 2,1 m. Nakon primarnog taloženja voda ulazi u aeracioni bazen bez recirkulacije. Zapremina aeracionog bazena je 13850 m³. Odrediti koncentraciju biorazgradivih partikulativnih i rastvorenih organskih materija i koncentraciju biomase na ulazu u sekundarni taložnik.

Podaci: $k = 10,5 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,09d^{-1}$, $K_s = 40 \frac{g}{m^3}$

Rešenje:

Efikasnost taloženja u primarnom taložniku, partikulativnog dela zagađenja (*bpCOD*) je :

$$\eta = \frac{h}{H} = \frac{2,1}{3,5} = 0,6 \rightarrow 60\%$$

$$bpCOD = bCOD - bsCOD = 520 - 212 = 308 \frac{g}{m^3}$$

Koncentracije zagađujućih materija na ulazu u aeracioni bazen:

$$bsCOD = 212 \frac{g}{m^3}$$

$$bpCOD = (1 - 0,6) \cdot 308 = 123,2 \frac{g}{m^3}$$

Protok otpadne vode kroz aeracioni bazen se računa na osnovu brzine proticanja otpadne vode kroz taložnik i površine poprečnog preseka taložnika, jer je protok kroz ceo sistem konstantan.

$$Q = A \cdot u$$

$$A = 6 \cdot 3,5 = 21 m^2$$

$$Q = 21 m^2 \cdot 0,05 \frac{m}{s} = 1,05 \frac{m^3}{s} = 3780 \frac{m^3}{h}$$

Pošto se ne vrši recirkulacija, hidrauličko vreme zadržavanja je jednako vremenu zadržavanja biomase u aeracionom bazenu:

$$\tau = \theta = \frac{V}{Q} = \frac{13850 m^3}{3780 \frac{m^3}{h}} = 3,7 h = 0,154 d$$

Koncentracija biorazgradivih rastvorenih materija na izlazu iz aeracionog bazena bez recirkulacije iznosi:

$$S = \frac{K_s(1 + \tau k_d)}{\tau(Yk - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{40 \cdot (1 + 0,154 \cdot 0,09)}{0,154 \cdot (0,5 \cdot 10,5 - 0,09) - 1}$$

$$S = 2,6 \frac{g \text{ bsCOD}}{m^3}$$

Zbog ne vršenja recirkulacije, odnosno kratkog vremena zadržavanja, partikulativni supstrat u nepromenjenom stanju izlazi iz aeracionog bazena:

$$bpCOD = 123,2 \frac{g}{m^3}$$

Koncentracija biomase u aeracionom bazenu iznosi:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \tau}$$

$$X = \frac{0,5 \cdot (212 - 2,6)}{1 + 0,09 \cdot 0,154}$$

$$X = 103,3 \frac{g \text{ biomase}}{m^3}$$

Zadatak 8. Protok otpadne vode iznosi $5230 \text{ m}^3/\text{d}$, a koncentracija organskih zagađujućih materija u njoj je $125 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$. Otpadna voda se tretira u postrojenju sa aktivnim muljem sa recirkulacijom. Koncentracija *MLSS* u recirkulacionom toku je tri puta veća od koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu. A odnos *MLVSS* i *MLSS* u aeracionom bazenu je 0,8. Vreme zadržavanja suspendovanih materija u aeracionom bazenu iznosi 6 dana, a hidrauličko vreme zadržavanja je 4 časa. Odrediti:

- 1) koncentraciju *MLSS* u recirkulacionom toku i u aeracionom bazenu;
- 2) protok recirkulacionog mulja;
- 3) protok otpadnog mulja.

Podaci: $k = 10,0 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 d^{-1}$, $K_s = 20 \frac{g}{m^3}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

- 1) Izračunavanje koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu i recirkulacionom toku:

$$X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{O_2}\theta}{\tau}$$

$$S = 2,6 \frac{g \text{ bsCOD}}{m^3}$$

Zbog ne vršenja recirkulacije, odnosno kratkog vremena zadržavanja, partikulativni supstrat u nepromenjenom stanju izlazi iz aeracionog bazena:

$$bpCOD = 123,2 \frac{g}{m^3}$$

Koncentracija biomase u aeracionom bazenu iznosi:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \tau}$$

$$X = \frac{0,5 \cdot (212 - 2,6)}{1 + 0,09 \cdot 0,154}$$

$$X = 103,3 \frac{g \text{ biomase}}{m^3}$$

Zadatak 8. Protok otpadne vode iznosi $5230 \text{ m}^3/d$, a koncentracija organskih zagađujućih materija u njoj je 125 g bsCOD/m^3 . Otpadna voda se tretira u postrojenju sa aktivnim muljem sa recirkulacijom. Koncentracija *MLSS* u recirkulacionom toku je tri puta veća od koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu. A odnos *MLVSS* i *MLSS* u aeracionom bazenu je 0,8. Vreme zadržavanja suspendovanih materija u aeracionom bazenu iznosi 6 dana, a hidrauličko vreme zadržavanja je 4 časa. Odrediti:

- 1) koncentraciju *MLSS* u recirkulacionom toku i u aeracionom bazenu;
- 2) protok recirkulacionog mulja;
- 3) protok otpadnog mulja.

Podaci: $k = 10,0 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 d^{-1}$, $K_s = 20 \frac{g}{m^3}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

- 1) Izračunavanje koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu i recirkulacionom toku:

$$X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

$$Q_r = \frac{1861 \cdot 5230}{5584 - 1861}$$

$$Q_r = 2614 \frac{m^3}{d}$$

3) izračunavanje protoka otpadnog mulja:

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r + Q_e X_e}$$

$$X_e = 0$$

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$V = \tau(Q + Q_r)$$

$$V = 0,17d \cdot (5230 + 2614) \frac{m^3}{d}$$

$$V = 1333 m^3$$

$$Q_w = \frac{VX}{\theta X_r}$$

$$Q_w = \frac{1333 \cdot 1861}{6 \cdot 5584}$$

$$Q_w = 74 \frac{m^3}{d}$$

Zadatak 9. Protok otpadne vode je $8530 m^3/d$. U otpadnoj vodi se nalazi $405 g bsCOD/m^3$ i $58 g nbpCOD/m^3$. Otpadna voda se tretira u postrojenju sa aktivnim muljem sa recirkulacijom. Koncentracija *MLSS* u recirkulacionom toku je dva ipo puta veća od koncentracije *MLSS* u aeracionom bazenu. A odnos *MLVSS* i *MLSS* u aeracionom bazenu je 0,7. Vreme zadržavanja suspendovanih materija u aeracionom bazenu iznosi 4 dana, a hidrauličko vreme zadržavanja je 6 h. Odrediti:

- 1) koncentraciju *MLSS* u recirkulacionom toku i u aeracionom bazenu;
- 2) protok recirkulacionog mulja;
- 3) protok otpadnog mulja.

Podaci: $k = 5,0 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 d^{-1}$, $K_s = 90 \frac{g}{m^3}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

1)

$$MLVSS = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

$$X_{o,i} = nbpCOD = 58 \text{ g/m}^3$$

$$S = \frac{K_s[1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{90 \cdot (1 + 0,1 \cdot 4)}{4 \cdot (0,5 \cdot 5 - 0,1) - 1}$$

$$S = 14,7 \frac{\text{g bsCOD}}{\text{m}^3}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]}$$

$$\tau = \frac{6}{24} = 0,25 \text{ d}$$

$$X = \frac{4}{0,25} \cdot \frac{0,5 \cdot (405 - 14,7)}{(1 + 0,1 \cdot 4)}$$

$$X = 2230 \frac{\text{g biomase}}{\text{m}^3}$$

$$MLVSS = 2230 + 0,15 \cdot 0,1 \cdot 2230 \cdot 4 + \frac{58 \cdot 4}{0,25}$$

$$MLVSS = 3292 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$MLSS = \frac{MLVSS}{0,7} = \frac{3292}{0,7} = 4703 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$MLSS_r = 2,5 \cdot MLSS = 2,5 \cdot 4703 = 11758 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

2)

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$Q_r = \frac{XQ}{X_r - X}$$

$$Q_r = \frac{4703 \cdot 8530}{11758 - 4703}$$

$$Q_r = 5686 \frac{m^3}{d}$$

3)

$$\theta = \frac{VX}{Q_w X_r + Q_e X_e}$$

$$X_e = 0$$

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$V = \tau(Q + Q_r)$$

$$V = 0,25 d \cdot (8530 + 5686) \frac{m^3}{d}$$

$$V = 3554 m^3$$

$$Q_w = \frac{VX}{\theta X_r}$$

$$Q_w = \frac{3554 \cdot 4703}{4 \cdot 11758}$$

$$Q_w = 355 \frac{m^3}{d}$$

Zadatak 10. Protok otpadne vode iznosi $16550 m^3/d$. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 7 dana. Biološki postupak prečišćavanja je zasnovan na korišćenju aktivnog mulja sa recirkulacijom. Recirkulacioni odnos (Q_r/Q) je jednak 0,6, a zapremina aeracionog bazena je $4766 m^3$. Koncentracija zagađujućih materija je $325 g bsCOD/m^3$.

Odrediti:

- 1) hidrauličko vreme zadržavanja;
- 2) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen da bi se izvršila konverzija zagađujućih materija od 98%.

Podaci: $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,09 d^{-1}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

1) Izračunavanje hidrauličkog vremena zadržavanja:

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$\frac{Q_r}{Q} = 0.6$$

$$Q_r = 0,6 \cdot 16550 = 9930 \frac{m^3}{d}$$

$$\tau = \frac{4766}{16550 + 9930}$$

$$\tau = 0,18 d$$

2) Na osnovu efikasnosti konverzije zagađujućih materija od 98% dobija se da je njihova izlazna koncentracija jednaka:

$$S = (1 - 0,98) \cdot 325 = 6,5 \frac{g \text{ bsCOD}}{m^3}$$

Potrebna količina kiseonika, da bi se izvršila ova konverzija zagađenja, iznosi:

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{X,bio}$$

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$P_{X,bio} = \frac{16550 \cdot 0,5 \cdot (325 - 6,5)}{1 + 0,09 \cdot 7} + \frac{0,15 \cdot 0,09 \cdot 16550 \cdot 0,5 \cdot (325 - 6,5) \cdot 7}{1 + 0,09 \cdot 7}$$

$$P_{X,bio} = 1770 \frac{kg}{d}$$

$$R_0 = 16550 \cdot (325 - 6,5) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 1770$$

$$R_0 = 2758 \frac{kg O_2}{d}$$

Zadatak 11. Protok otpadne vode iznosi $12050 \text{ m}^3/\text{d}$. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 7 dana. Biološki postupak prečišćavanja je zasnovan na korišćenju aktivnog mulja sa recirkulacijom. Recirkulacioni odnos (Q_r/Q) je jednak 0,6, a zapremina aeracionog bazena je 3100 m^3 . Koncentracija zagađujućih materija je $500 \text{ g rbCOD}/\text{m}^3$. Odrediti:

- 1) hidrauličko vreme zadržavanja;
- 2) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen da bi se izvršila konverzija zagađujućih materija od 95% .

Podaci: $Y = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,09 \text{ d}^{-1}$, $f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$

Rešenje:

1)

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$\frac{Q_r}{Q} = 0,6$$

$$Q_r = 0,6 \cdot 12050 = 7230 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$\tau = \frac{3100}{12050 + 7230}$$

$$\tau = 0,16 \text{ d}$$

2)

$$S = (1 - 0,95) \cdot 500 = 25 \frac{\text{g rbCOD}}{\text{m}^3}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$P_{X,bio} = \frac{12050 \cdot 0,5 \cdot (500 - 25) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,09 \cdot 7} + \frac{0,15 \cdot 0,09 \cdot 12050 \cdot 0,5 \cdot (500 - 25) \cdot 10^{-3} \cdot 7}{1 + 0,09 \cdot 7}$$

$$P_{X,bio} = 1922 \frac{kg}{d}$$

$$R_0 = 12050 \cdot (500 - 25) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 1922$$

$$R_0 = 2994,5 \frac{kg O_2}{d}$$

Zadatak 12. U aeracioni bazen bez recirkulacije, komunalna otpadna voda ulazi sa protokom od $570 m^3/h$. Koncentracija zagađujućih rastvorenih biorazgradivih organskih materija na ulazu u aeracioni bazen je $130 g bsCOD/m^3$. Aeracioni bazen obezbeđuje 80% konverzije zagađujućih materija. Odrediti hidrauličko vreme zadržavanja ako je minimalno zadovoljen uslov rasta mikroorganizama u aeracionom bazenu.

Podaci: $\mu_m = 0,4 h^{-1}$, $K_s = 50 \frac{g}{m^3}$, $Y = 0,5 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,09 d^{-1}$,
 $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

Koncentracija zagađujućih materija na izlazu iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = (1 - 0,8) \cdot 130 = 26 \frac{g}{m^3}$$

Uslov rasta mikroorganizama u bioreaktoru je da je brzina razblaženja (ispiranja) biomase iz sistema manja ili jednaka specifičnoj brzini rasta mikroorganizama:

$$D \leq \mu$$

A minimalano zadovoljen uslov rasta mikroorganizama u aeracionom bazenu je kada su ove dve veličine jednake:

$$D = \mu$$

Vrednost specifične brzine rasta mikroorganizama se računa primenom Monodove jednačine:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} = 0,4 \cdot \frac{26}{50 + 26} = 0,14 \text{ h}^{-1}$$

Pa se dobija da je hidrauličko vreme zadržavanja:

$$\mu = D = \frac{1}{\tau}$$

$$\tau = \frac{1}{0,14} = 7,14 \text{ h} = 0,30 \text{ d}$$

Zadatak 13. Postrojenje za tretman otpadnih voda sa aktivnim muljem i recirkulacijom se nalazi na nadmorskoj visini od 457 m. Protok otpadne vode iznosi $1860 \text{ m}^3/\text{d}$ a otpadna voda sadrži $230 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$ biorazgradivih rastvorenih organskih materija. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 5 dana. Temperatura otpadne vode je $25 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura vazduha je $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Korekcionni faktor α iznosi 0,6, a β 0,95. Procenat kiseonika u izlaznom gasu iz aeracionog bazena iznosi 20%. Zahtevana koncentracija rastvorenog kiseonika u aeracionom bazenu je $2 \text{ mg}/\text{L}$. Aerisanje bazena se vrši difuzerima. Dubina aeracionog bazena je 5 m, a difuzeri su postavljeni na 0,45 m od dna bazena. Protok vazduha kroz jedan difuzer je $0,400 \text{ m}^3/\text{min}$ na standardnim uslovima.

Odrediti:

- 1) potrebnu količinu kiseonika, (kg/d);
- 2) potrebnu količinu vazduha, ako su karakteristike difuzera date jednačinom:

$$N = 0,0423 Q^{0,9} H_D^{0,67} (C_m - C_L) \cdot 1,02^{(T-20)} \cdot \alpha$$

Podaci: $k = 8,75 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$, $Y = 0,4 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,088 \text{ d}^{-1}$, $K_s = 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$,

$$f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$$

$P(\text{na nivo morā}) = 760 \text{ mm Hg}$, $P(\text{na } 457\text{m}) = 719,6 \text{ mm Hg}$,
 $c(25^\circ\text{C, nivo morā}) = 8,24 \text{ mg/L}$

Rešenje:

1) Izračunavanje potrebne količine kiseonika:

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{X,bio}$$

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{20 \cdot (1 + 5 \cdot 0,088)}{5 \cdot (0,4 \cdot 8,75 - 0,088) - 1}$$

$$S = 1,79 \frac{\text{g bsCOD}}{\text{m}^3}$$

$$P_{X,bio} = \frac{1860 \cdot 0,4 \cdot (230 - 1,79) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,088 \cdot 5} + \frac{0,15 \cdot 0,088 \cdot 1860 \cdot 0,4 \cdot (230 - 1,79) \cdot 10^{-3} \cdot 5}{1 + 0,088 \cdot 5}$$

$$P_{X,bio} = 117,9 + 7,78 = 125,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$R_0 = 1860 \cdot (230 - 1,74) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 125,7$$

$$R_0 = 246 \frac{\text{kgO}_2}{\text{d}}$$

2) Izračunavanje potrebne količine vazduha:

$$C_s(25^\circ\text{C, } 457\text{m}) = c_s(25^\circ\text{C, nivo morā}) \cdot \frac{p(457\text{m})}{p(\text{nivo morā})}$$

$$C_s(25^\circ\text{C, } 457\text{m}) = 8,24 \cdot \frac{719,6}{760}$$

$$C_s(25^\circ\text{C, } 457\text{m}) = 7,80 \text{ mg/L}$$

$$C_w = \beta \cdot C_s = 0,95 \cdot 7,80 = 7,41 \text{ mg/L}$$

$$C_m = C_w \left(\frac{P_r}{203} + \frac{O_e}{42} \right)$$

$$P = 5m - 0,45m = 4,55m = \frac{4,55}{0,000102} = 44,6 \text{ kPa}$$

$$P_r = 44,6 + 101,37 \cdot \frac{719,6}{760} = 140,5 \text{ kPa}$$

$$C_m = 7,41 \cdot \left(\frac{140,5}{203} + \frac{20}{42} \right) = 8,66 \text{ mg/l}$$

$$H_D = 5m - 0,45m = 4,55m$$

$$N = 0,0423 Q^{0,9} H_D^{0,67} (C_m - C_L) \cdot 1,02^{(T-20)} \cdot \alpha$$

$$N = 0,0423 \cdot 0,400^{0,9} \cdot 4,55^{0,67} \cdot (8,66 - 2,0) \cdot 1,02^{25-20} \cdot 0,6$$

$$N = 0,226 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}} = 5,42 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$$

$$\text{Broj difuzera} = \frac{R_0}{N} = \frac{246 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}}{5,42 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}} = 45,4 \approx 46$$

$$Q_{\text{vaz}} = 0,400 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot 46 = 18,4 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 1104 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ na standardnim uslovima}$$

Atmosferski pritisak iznad postrojenja: $P_{\text{atm}} = \frac{719,6}{760} = 0,947 \text{ atm}$

Apsolutna temperatura vazduha na 20 °C : $T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$

Apsolutna temperatura vazduha na 30 °C : $T_2 = 30 + 273 = 303 \text{ K}$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = \frac{1 \text{ atm}}{0,947 \text{ atm}} \cdot \frac{303 \text{ K}}{293 \text{ K}} \cdot \frac{1104 \text{ m}^3}{h}$$

$$= 1205,6 \frac{\text{m}^3}{h} \text{ na radnim uslovima}$$

Zadatak 14. Pre aeracionog bazena sa aktivnim muljem komunalna otpadna voda prolazi kroz primarni taložnik pravougaonog oblika, protokom od $9250 \text{ m}^3/\text{d}$. Vreme zadržavanja vode u taložniku je 2 h , širina taložnika je $7,4 \text{ m}$ a dužina $29,6 \text{ m}$. Ulazna koncentracija zagađujućih rastvorenih biorazgradivih organskih materija u primarni taložnik iznosi $105 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$, bionerazgradivih partikulativnih organskih materija $98 \text{ g nbpCOD}/\text{m}^3$, a inertnih $170 \text{ g iTSS}/\text{m}^3$. Organske bionerazgradive partikulativne materije se talože sa visine od $2,8 \text{ m}$, a inertne materije se talože sa efikasnošću od 90% .

Nakon primarnog taloženja voda ulazi u aeracioni bazen sa recirkulacijom. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 6 dana .

Odrediti:

- 1) koncentraciju zagađujućih materija na ulazu u aeracioni bazen;
- 2) produktivnost mulja.

Podaci:

$$Y = 0,5 \frac{\text{gVSS}}{\text{gbsCOD}}, \quad k_d = 0,09 \text{ d}^{-1}, \quad f_d = 0,15 \frac{\text{gVSS}}{\text{gVSS}}, \quad K_s = 30 \frac{\text{gbsCOD}}{\text{m}^3},$$

$$k = 10,5 \frac{\text{g bsCOD}}{\text{g VSS} \cdot \text{d}}$$

Rešenje:

- 1) Izračunavanje koncentracije zagađujućih materija na izlazu iz taložnika, odnosno na ulazu u aeracioni bazen:

$$V = t \cdot Q = 2 \cdot \frac{9250}{24} = 770,8 \text{ m}^3$$

$$V = H \cdot L \cdot W \rightarrow H = \frac{V}{L \cdot W} = \frac{770,8}{7,4 \cdot 29,6} = 3,5 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{h}{H} = \frac{2,8}{3,5} = 0,8 \rightarrow 80\%$$

$$bsCOD = 105 \frac{g}{m^3}$$

$$nbpCOD = nbVSS_i = (1 - 0,8) \cdot 98 = 19,6 \frac{g}{m^3}$$

$$iTSS = (1 - 0,9) \cdot 170 = 17 \frac{g}{m^3}$$

2) Izračunavanje količine nastalih suspendovanih materija u toku dana, odnosno izračunavanje produktivnosti ukupnog mulja:

$$S = \frac{K_s[1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1} = \frac{30 \cdot [1 + 0,09 \cdot 6]}{6 \cdot (0,5 \cdot 10,5 - 0,09) - 1} = 1,54 \frac{g \text{ rbCOD}}{m^3}$$

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + QX_{o,i} + QiTSS$$

$$P_{X,TSS} = \frac{9250 \cdot 0,5 \cdot (105 - 1,54)}{1 + 0,09 \cdot 6} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{0,15 \cdot 0,09 \cdot 0,5 \cdot 9250 \cdot (105 - 1,54) \cdot 6}{1 + 0,09 \cdot 6} \cdot \frac{1}{0,85} + 9250 \cdot 19,6 + 9260 \cdot 17$$

$$P_{X,TSS} = 365548 + 29609 + 338720 = 733877 \frac{g}{d} = 733,9 \frac{kg}{d}$$

Zadatak 15. Za tretman komunalne otpadne vode, nakon primarnog taloženja se koristi aktivni mulj sa recirkulacijom. Protok komunalne otpadne vode iznosi $1000 \text{ m}^3/\text{d}$. U otpadnoj vodi se nalazi $192 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$, $30 \text{ g nbpCOD}/\text{m}^3$, $10 \text{ g iTSS}/\text{m}^3$. Koncentracija *MLVSS* u aeracionom bazenu je $2500 \text{ g}/\text{m}^3$. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 4 dana.

Odrediti:

1) koncentraciju *bsCOD* u efluentu biološkog tretmana;

- 2) hidrauličko vreme zadržavanja;
 3) udeo biomase u *MLVSS*;
 4) produkciju organskog dela mulja.

Podaci: $k = 12,5 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,4 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,10 d^{-1}$, $K_s = 100 \frac{g}{m^3}$,

$f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

- 1) U efluentu biološkog tretmana se nalazi samo rastvoren neuklonjen supstrat, dok se sav partikulativni deo taloži u sekundarnom taložniku. Koncentracija *bsCOD* u efluentu iznosi:

$$S = \frac{K_s [1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1} = \frac{100 \frac{g}{m^3} [1 + 0,10 d^{-1} \cdot 4d]}{4d \cdot [0,4 \frac{g}{g} \cdot 12,5 \frac{g}{g \cdot d} - 0,10 d^{-1}] - 1}$$

$$S = 7,5 \frac{g \text{ bsCOD}}{m^3}$$

- 2) Izračunavanje hidrauličkog vremena zadržavanja:

$$X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

$$2500 = \frac{4 \cdot 0,4 \cdot (192 - 7,5)}{\tau \cdot [1 + 0,10 \cdot 4]} + 0,15 \cdot 0,10 \cdot X \cdot 4 + \frac{30 \cdot 4}{\tau}$$

$$2500 = \frac{210,9}{\tau} + 0,06 \cdot X + \frac{120}{\tau}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} = \frac{210,9}{\tau}$$

$$2500 = \frac{210,9}{\tau} + 0,06 \cdot \frac{210,9}{\tau} + \frac{120}{\tau}$$

$$\tau = 0,14d$$

- 3) Udeo biomase u *MLVSS* se dobija iz odnosa koncentracija:

$$X = \frac{210,9}{\tau} = \frac{210,9}{0,14} = 1506 \frac{g}{m^3}$$

$$f(\text{biomase}) = \frac{X}{X_{MLVSS}} = \frac{1506}{2500} = 0,60 \rightarrow 60\%$$

Izračunavanje produkcije organskog dela mulja:

$$V = Q \cdot \tau = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 0,14 \text{ d} = 140 \text{ m}^3$$

$$X_{MLVSS} \cdot V = P_{X,VSS} \cdot \theta$$

$$P_{X,VSS} = \frac{X_{MLVSS} \cdot V}{\theta} = \frac{2500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 140 \text{ m}^3}{4 \text{ d}} = 87,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Zadatak 16. Otpadna voda dolazi na postrojenje protokom od $12350 \text{ m}^3/\text{d}$. Biološki tretman se obavlja u aeracionom bazenu sa aktivnim muljem i recirkulacijom iz sekundarnog taložnika. Otpadna voda sadrži $nbCOD$ 182 mg/L , $iTSS$ 15 mg/L , $nbsCOD$ 95 g/m^3 , $bsCOD$ 200 mg/L . U aeracionom bazenu u kome se obavlja 95% konverzije zagađenja, nalazi se 4000 mg/L MLSS . U recirkulacionoj struji $MLSS$ iznosi 7000 mg/L . Vreme zadržavanja suspendovanih materija je jednako 7 dana.

Izračunati:

- 1) koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu i hidrauličko vreme zadržavanja;
- 2) zapreminu aeracionog bazena.

Podaci: $f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,1 \text{ d}^{-1}$, $Y = 0,5 \text{ mg/mg}$

Rešenje:

- 1) Supstrat predstavlja rastvorene biorazgradive materije,

$$S_o = bsCOD = 200 \text{ mg/L}$$

a njihova koncentracija na izlazu iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = (1 - 0,95) \cdot 200 = 10 \text{ mg } bsCOD/L$$

U efluentu biološkog tretmana, nakon sekundarnog taložnika, će se pored neuklonjene količine $bsCOD$, naći i količina $nbsCOD$, koja zbog svoje rastvorene bionerazgradive prirode

ostaje nepromenjena u biološkom tretmanu i kao takva izlazi iz njega.

MLSS u sebi pored *MLVSS* sadrži i inertne materije koje dolaze sa influentom. Pošto vrednost koncentracije *MLVSS* u aeracionom bazenu nije data, koncentracija biomase će se izračunati na sledeći način:

$$nbpCOD = nbVSS_i = nbCOD - nbsCOD = 182 - 95 = 87 \text{ mg/L}$$

$$X = MLSS - iTSS - nbVSS_i - f_d k_d \theta X = 4000 - 15 - 87 - 0,15 \cdot 0,1 \cdot 7 \cdot X$$

$$X = 3898 - 0,105 \cdot X$$

$$X = \frac{3898}{1 + 0,105}$$

$$X = 3528 \text{ mg/l}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau(1 + k_d \theta)}$$

$$\tau = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{X(1 + k_d \theta)}$$

$$\tau = \frac{7 \cdot 0,5 \cdot (200 - 10)}{3528 (1 + 0,1 \cdot 7)}$$

$$\tau = 0,11d$$

2) Izračunavanje zapremine aeracionog bazena:

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$V = \tau(Q + Q_r)$$

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$Q_r = \frac{QX}{X_r - X}$$

$$V = \tau \left(Q + \frac{QX_{MLSS}}{X_{MLSSr} - X_{MLSS}} \right)$$

$$V = 0,11 \cdot \left(12350 + \frac{12350 \cdot 4000}{7000 - 4000} \right)$$

$$V = 3170 \text{ m}^3$$

Zadatak 17. Otpadna voda dolazi na postrojenje protokom od $20500 \text{ m}^3/\text{d}$. Biološki tretman se obavlja u aeracionom bazenu sa aktivnim muljem i recirkulacijom iz sekundarnog taložnika. Otpadna voda sadrži $pCOD$ 215 mg/L , $iTSS$ 20 mg/L , $bpCOD$ 135 g/m^3 , $bsCOD$ 312 mg/L . U aeracionom bazenu u kome se obavlja 93% konverzije zagađenja se nalazi 3800 mg/L MLSS . U recirkulacionoj struji $MLSS$ iznosi 8500 mg/L . Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 8 dana.

Izračunati:

- 1) koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu i hidrauličko vreme zadržavanja;
- 2) zapreminu aeracionog bazena.

Podaci: $f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,09 \text{ d}^{-1}$, $Y = 0,6 \text{ mg/mg}$

Rešenje:

- 1) Supstrat u aeracionom bazenu predstavljaju materije $bsCOD$ i materije $bpCOD$ koje zbog dovoljnog vremena zadržavanja od 8 dana uspevaju da se prevedu u rastvoreno stanje. Stoga je ukupna koncentracija supstrata jednaka:

$$S_0 = bsCOD + bpCOD$$

$$S_0 = 312 + 135 = 447 \text{ mg/L}$$

Nakon konverzije od 93%, izlazna koncentracija supstrata iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = (1 - 0,93) \cdot 447 = 31,3 \text{ mg } bCOD/L$$

Podatak koji je potreban je koncentracija $nbpCOD$ koja ulazi u $MLSS$:

$$nbpCOD = nbVSS_i = pCOD - bpCOD = 215 - 135$$

$$= 80 \text{ mg/L}$$

Sada se može izračunati da je koncentracija aktivne biomase jednaka:

$$X = MLSS - iTSS - nbVSS_i - f_d k_d \theta X$$

$$= 3800 - 20 - 80 - 0,15 \cdot 0,09 \cdot 8 \cdot X$$

$$X = 3700 - 0,108 \cdot X$$

$$X = \frac{3700}{(1 + 0,108)}$$

$$X = 3339 \text{ mg/l}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau (1 + k_d \theta)}$$

a hidrauličko vreme iznosi:

$$\tau = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{X (1 + k_d \theta)}$$

$$\tau = \frac{8 \cdot 0,6 \cdot (447 - 31,3)}{3339 \cdot (1 + 0,09 \cdot 8)}$$

$$\tau = 0,35 \text{ d}$$

2) Izračunavanje zapremine aeracionog bazena:

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$V = \tau(Q + Q_r)$$

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$Q_r = \frac{QX}{X_r - X}$$

$$V = \tau \left(Q + \frac{QX_{MLSS}}{X_{MLSSr} - X_{MLSS}} \right)$$

$$V = 0,35 \cdot \left(20500 + \frac{20500 \cdot 3800}{8500 - 3800} \right)$$

$$V = 12976 \text{ m}^3$$

Zadatak 18. Postrojenje za tretman otpadnih voda tretira $11300 \text{ m}^3/\text{d}$ komunalne otpadne vode. Nakon primarnog taloženja otpadna voda sadrži $35 \text{ g iTSS}/\text{m}^3$, $76 \text{ g nbpCOD}/\text{m}^3$, $400 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$. Zapremina aeracionog bazena sa recirkulacijom iznosi 10848 m^3 . Koncentracija *MLVSS* u aeracionom bazenu iznosi 2500 mg/L , a vreme zadržavanja čestica u aeracionom bazenu je 6 dana. Izračunati:

1) hidrauličko vreme zadržavanja i koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu;

2) koncentraciju *MLSS* u recirkulacionom toku.

Podaci: $k = 5 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$, $Y = 0,6 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,08 \text{ d}^{-1}$, $K_s = 50 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, $f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$

Rešenje:

1) Koncentracija rastvorenog biorazgradivog supstrata na izlazu iz aeracionog bazena iznosi:

$$S = \frac{K_s[1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{50 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}{6 \cdot (0,6 \cdot 5 - 0,08) - 1}$$

$$S = 4,1 \text{ gbsCOD}/\text{m}^3$$

Primenom jednačine za izračunavanje koncentracije *MLVSS* u aeracionom bazenu, dobijaju se vrednosti za koncentraciju biomase i hidrauličko vreme zadržavanja na sledeći način:

$$X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

$$2500 = \frac{6 \cdot 0,6 \cdot (400 - 4,1)}{\tau \cdot [1 + 0,08 \cdot 6]} + 0,15 \cdot 0,08 \cdot X \cdot 6 + \frac{76 \cdot 6}{\tau}$$

$$2500 = \frac{963}{\tau} + 0,072 \cdot X + \frac{456}{\tau}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} = \frac{963}{\tau}$$

$$2500 = \frac{963}{\tau} + 0,072 \cdot \frac{963}{\tau} + \frac{456}{\tau}$$

$$2500 = \frac{1488,3}{\tau}$$

$$\tau = 0,60 \text{ d}$$

$$X = \frac{963}{0,6} = 1605 \text{ mg/L}$$

2) Izračunavanje koncentracije $MLSS$ u recirkulacionom toku:

$$MLSS = MLVSS + iTSS = 2500 + 35 = 2535 \text{ mg/L}$$

$$\tau = \frac{V}{Q + Q_r}$$

$$Q + Q_r = \frac{V}{\tau} = \frac{10848}{0,60} = 18080 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$Q_r = 18080 - Q = 18080 - 11300 = 6780 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$X_{MLSSr} = \frac{(Q + Q_r)X_{MLSS}}{Q_r}$$

$$X_{MLSSr} = \frac{18080 \cdot 2535}{6780}$$

$$X_{MLSSr} = 6760 \text{ mg/L}$$

Zadatak 19. Postrojenje za tretman otpadnih voda tretira $7500 \text{ m}^3/\text{d}$ komunalne otpadne vode. Nakon primarnog taloženja otpadna voda sadrži $100 \text{ g iTSS}/\text{m}^3$, $40 \text{ g nbpCOD}/\text{m}^3$, $36 \text{ g bpCOD}/\text{m}^3$, $214 \text{ g bsCOD}/\text{m}^3$. Biološkom obradom se obezbeđuje uklanjanje od 90% rastvorenih zagađujućih materija. Polovina ulaznog protoka se recirkuliše nazad u aeracioni bazen. Koncentracija $MLVSS$ u aeracionom bazenu iznosi 2000 mg/L , a vreme zadržavanja čestica u aeracionom bazenu je 5 dana. Izračunati:

- 1) hidrauličko vreme zadržavanja i koncentraciju aktivne biomase u aeracionom bazenu;
- 2) koncentraciju $MLSS$ u recirkulacionom toku.

Podaci: $k = 8 \frac{g}{g \cdot d}$, $Y = 0,6 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 d^{-1}$, $K_s = 80 \frac{g}{m^3}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$

Rešenje:

1) Supstrat predstavljaju biorazgradive materije, $bCOD$, čija koncentracija iznosi:

$$S_0 = bCOD = bsCOD + bpCOD = 214 + 36 = 250 \frac{g}{m^3}$$

$$S = (1 - 0,90) \cdot 250 = 25 \frac{g}{m^3}$$

$$X_{MLVSS} = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} + (f_d)(k_d)(X)\theta + \frac{X_{o,i}\theta}{\tau}$$

$$2000 = \frac{5 \cdot 0,6 \cdot (250 - 25)}{\tau \cdot [1 + 0,1 \cdot 5]} + 0,15 \cdot 0,1 \cdot X \cdot 5 + \frac{40 \cdot 5}{\tau}$$

$$2000 = \frac{675}{\tau} + 0,075 \cdot X + \frac{200}{\tau}$$

$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau [1 + (k_d)\theta]} = \frac{675}{\tau}$$

$$2000 = \frac{675}{\tau} + 0,075 \cdot \frac{675}{\tau} + \frac{200}{\tau}$$

$$2000 = \frac{926}{\tau}$$

$$\tau = 0,46$$

$$X = \frac{675}{0,46} = 1467 \text{ mg/L}$$

2)

$$MLSS = MLVSS + iTSS = 2000 + 100 = 2100 \text{ mg/l}$$

$$Q_r = 0,5 \cdot Q$$

$$Q_r = 0,5 \cdot 7500 = 3750 \frac{m^3}{d}$$

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

$$X_{MLSSr} = \frac{(Q + Q_r)X_{MLSS}}{Q_r}$$

$$X_{MLSSr} = \frac{(7500 + 3750) \cdot 2100}{3750}$$

$$X_{MLSSr} = 6300 \text{ mg/L}$$

Zadatak 20. Protok otpadne vode, Q iznosi $19050 \text{ m}^3/\text{d}$. Proces se odvija sa recirkulacijom mulja. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 8 dana. Koncentracije zagađujućih materija iznose 300 g bsCOD/m^3 , 55 g nbpCOD/m^3 . Odrediti:

- 1) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen;
- 2) produkciju organskog dela mulja.

Podaci: $Y = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $k_d = 0,09 \text{ d}^{-1}$, $f_d = 0,15 \frac{\text{g}}{\text{g}}$, $K_s = 60 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, $k = 6 \text{ d}^{-1}$

Rešenje:

1)

$$S = \frac{K_s[1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{60 \cdot (1 + 0,09 \cdot 8)}{8 \cdot (0,5 \cdot 6 - 0,09) - 1}$$

$$S = 4,6 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$P_{x,bio} = \frac{19050 \cdot 0,5 \cdot (300 - 4,6) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,09 \cdot 8} + \frac{0,15 \cdot 0,09 \cdot 19050 \cdot 0,5 \cdot (300 - 4,6) \cdot 10^{-3} \cdot 8}{1 + 0,09 \cdot 8}$$

$$P_{x,bio} = 1635,86 + 176,7 = 1812,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$R_0 = 19050 \cdot (300 - 4,6) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 1812,5$$

$$= 3053,6 \frac{kgO_2}{d}$$

2)

$$P_{x,VSS} = P_{x,bio} + QX_{o,i}$$

$$P_{x,VSS} = 1812,5 + 19050 \cdot 55 \cdot 10^{-3} = 2860,2 \frac{kg}{d}$$

Zadatak 21. Protok otpadne vode Q , iznosi $8150 \text{ m}^3/d$. Proces se odvija sa recirkulacijom mulja. Vreme zadržavanja suspendovanih materija je 4 dana. Koncentracije zagađujućih materija iznose 170 g bsCOD/m^3 , 65 g nbpCOD/m^3 , 90 g iTSS/m^3 . Odrediti:

- 1) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen;
- 2) produkciju ukupnog mulja.

Podaci: $Y = 0,7 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,06 d^{-1}$, $f_d = 0,15 \frac{g}{g}$, $K_s = 85 \frac{g}{m^3}$, $k = 4 d^{-1}$

Rešenje:

1)

$$S = \frac{K_s[1 + (k_d)\theta]}{\theta(Y \cdot k - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{85 \cdot (1 + 0,06 \cdot 4)}{4 \cdot (0,7 \cdot 4 - 0,06) - 1}$$

$$S = 10,6 \frac{g}{m^3}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$P_{x,bio} = \frac{8150 \cdot 0,7 \cdot (170 - 10,6) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,06 \cdot 4} + \frac{0,15 \cdot 0,06 \cdot 8150 \cdot 0,7 \cdot (170 - 10,6) \cdot 10^{-3} \cdot 4}{1 + 0,06 \cdot 4}$$

$$P_{x,bio} = 733,4 + 26,4 = 760 \frac{kg}{d}$$

$$R_0 = 8150 \cdot (170 - 10,6) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 760 = 220 \frac{kgO_2}{d}$$

2)

$$P_{x,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + QX_{o,i} + QiTSS$$

$$P_{x,TSS} = 733,4 \cdot \frac{1}{0,85} + 26,4 \cdot \frac{1}{0,85} + 8150 \cdot 65 \cdot 10^{-3} + 8150 \cdot 90 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,TSS} = 2157 \frac{kg}{d}$$

Zadatak 22. Protok otpadne vode, Q , iznosi $2000 \text{ m}^3/d$. Vreme zadržavanja čestica u bazenu je 4 dana. Na ulazu u bazen koncentracija $bsCOD$ iznosi 243 g/m^3 , a u bazenu se uklanja 93% ovog zagađenja. Pored rastvorenog biorazgradivog zagađenja otpadna voda sadrži i 105 g nbpCOD/m^3 . Koncentracija $MLVSS$ u aeracionom bazenu iznosi 2500 mg/L .

Izračunati:

- 1) zapreminu aeracionog bazena;
 - 2) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen.
- Podaci: $Y = 0,6 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 \text{ d}^{-1}$, $f_d = 0,15 \text{ g/g}$

Rešenje:

1)

$$S = (1 - 0,93) \cdot 243 = 17 \text{ g/m}^3$$

$$P_{x,vss} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + QX_{o,i}$$

$$\begin{aligned} P_{x,vss} &= \frac{2000 \cdot 0,6 \cdot (243 - 17) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,1 \cdot 4} \\ &+ \frac{0,15 \cdot 0,1 \cdot 2000 \cdot 0,6 \cdot (243 - 17) \cdot 10^{-3} \cdot 4}{1 + 0,1 \cdot 4} + 2000 \cdot \end{aligned}$$

$$105 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,VSS} = 200 + 12 + 200 = 422 \frac{kg}{d}$$

$$X_{MLVSS} \cdot V = P_{x,VSS} \cdot \theta$$

$$V = \frac{P_{x,VSS} \cdot \theta}{X_{MLVSS}}$$

$$V = \frac{422 \cdot 4}{2500 \cdot 10^{-3}} = 675,2 m^3$$

2)

$$P_{x,bio} = P_{x,VSS} - QX_{o,i}$$

$$P_{x,bio} = 422 - 2000 \cdot 105 \cdot 10^{-3} = 212 \frac{kg}{d}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

$$R_0 = 2000 \cdot (243 - 17) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 212 = 151 \frac{kgO_2}{d}$$

Zadatak 23. Protok otpadne vode, Q , iznosi $5000 m^3/d$. Vreme zadržavanja čestica u bazenu je 7 dana. Na ulazu u bazen koncentracija $bsCOD$ iznosi $375 g/m^3$, a u bazenu se uklanja 95% ovog zagađenja. Pored rastvorenog biorazgradivog zagađenja otpadna voda sadrži i $85 g nbpCOD/m^3$. Masa $MLSS$ u aeracionom bazenu iznosi $14350 kg$.

Izračunati:

- 1) produkciju organskog mulja i produkciju ukupnog mulja;
 - 2) količinu kiseonika koju je potrebno uneti u aeracioni bazen.
- Podaci: $Y = 0,6 \frac{g}{g}$, $k_d = 0,1 d^{-1}$, $f_d = 0,15 g/g$

Rešenje:

1)

$$S = (1 - 0,95) \cdot 375 = 19 g/m^3$$

$$P_{x,vss} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + QX_{o,i}$$

$$P_{x,vss} = \frac{5000 \cdot 0,6 \cdot (375 - 19) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,1 \cdot 7} + \frac{0,15 \cdot 0,1 \cdot 5000 \cdot 0,6 \cdot (375 - 19) \cdot 10^{-3} \cdot 7}{1 + 0,1 \cdot 7} + 5000 \cdot 85 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,vss} = 628,2 + 65,96 + 425 = 1119 \frac{kg}{d}$$

$$M_{MLSS} = P_{x,TSS} \cdot \theta$$

$$P_{x,TSS} = \frac{M_{MLSS}}{\theta} = \frac{14350}{7} = 2050 \frac{kg}{d}$$

2)

$$P_{x,bio} = P_{x,vss} - QX_{o,i}$$

$$P_{x,bio} = 1119 - 5000 \cdot 85 \cdot 10^{-3} = 694 \frac{kg}{d}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio}$$

$$R_0 = 5000 \cdot (375 - 19) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 694 = 794,5 \frac{kgO_2}{d}$$

Uklanjanje BOD sa i bez nitrifikacije

Zadatak 24. Projektovati sistem sa aktivnim muljem i kompletnim mešanjem za tretiranje $22464 \text{ m}^3/d$ otpadne vode,

- A) za dostizanje koncentracije BOD u efluentu manje od 30 g/m^3 ,
- B) za postizanje uklanjanja BOD i nitrifikacije, sa koncentracijom NH_4 u efluentu od $0,50 \text{ g/m}^3$ i koncentracijom BOD i TSS u efluentu manjom ili jednakom 15 g/m^3 .

Uporediti projektne parametre oba sistema u sumarnoj tabeli.

U aeracionom bazenu temperatura otpadne vode iznosi 12 °C.

Karakteristike otpadne vode su date u tabeli:

Konstituent	Koncentracija, g/m^3
<i>BOD</i>	140
<i>sBOD</i>	70
<i>COD</i>	300
<i>sCOD</i>	132
<i>rbCOD</i>	80
<i>TSS</i>	70
<i>VSS</i>	60
<i>TKN</i>	35
<i>NH₄</i>	25
<i>TP</i>	6
<i>Alkalitet</i>	140 kao $CaCO_3$
<i>bCOD/BOD</i>	1,6

Projektni uslovi i pretpostavke:

1. Keramički difuzeri rade sa efikasnošću prenosa kiseonika u čistu vodu od 35%
2. Dubina vode u aeracionom bazenu je 4,9 m
3. Difuzeri su postavljeni na 0,5 m od dna aeracionog bazena
4. Koncentracija rastvorenog kiseonika (*DO*) u aeracionom bazenu je $2,0 g/m^3$
5. Postrojenje se nalazi na 500 m nadmorske visine ($P = 95,6 kPa$)
6. Faktor α za uklanjanje samo *BOD* iznosi 0,50, a sa nitrifikacijom 0,65; faktor β za oba slučaja iznosi 0,95, a faktor zaprljanosti difuzera je $F = 0,90$
7. Koristiti kinetičke parametre iz tabeła:

Tabela 6.2. Kinetički parametri za proces sa aktivnim muljem za heterotrofne bakterije na 20°C

Koeficijent	Jedinice	Opseg	Tipična vrednost
μ_m	$\frac{g}{g \cdot d}$	3,0 – 13,2	6,0
K_s	$\frac{g}{m^3}$	5,0 – 40,0	20,0
Y	$\frac{g}{g}$	0,30 – 0,50	0,40
k_d	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,06 – 0,20	0,12
f_d	-	0,08 – 0,20	0,15
θ Vrednost za:	μ_m	-	1,03 – 1,08
	k_d		1,03 – 1,08
	K_s		1,00

Tabela 6.3 Kinetički parametri za proces sa aktivnim muljem za nitrifikacione bakterije na 20°C

Koeficijent	Jedinice	Opseg	Tipična vrednost
μ_{mn}	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,20 – 0,90	0,75
K_n	$\frac{g}{m^3}$	0,5 – 1,0	0,74
Y_n	$\frac{g}{g}$	0,1 – 0,15	0,12
k_{dn}	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,05 – 0,15	0,08
K_o	$\frac{g}{m^3}$	0,40 – 0,60	0,50
θ Vrednost za:	μ_{mn}	-	1,06 – 1,123
	K_n		1,03 – 1,123
	k_{dn}		1,03 – 1,08

8. Vreme zadržavanja ćelija, θ , za uklanjanje BOD je 5 dana
9. Koncentracija MLSS, X_{MLSS} iznosi 3000 g/m^3
10. Faktor sigurnosti za TKN (maksimalni/srednji) je $FS = 1,5$

Rešenje:

A) Uklanjanje **BOD** bez nitrifikacije

1) Izračunavanje vrednosti konstituenata otpadne vode potrebnih za dalji proračun.

$$bCOD = 1,6 \cdot BOD = 1,6 \cdot 140 = 224 \text{ g/m}^3$$

$$nbCOD = COD - bCOD = 300 - 224 = 76 \text{ g/m}^3$$

$$nbsCOD = sCOD - 1,6 \cdot sBOD = 132 - 1,6 \cdot 70 = 20 \text{ g/m}^3$$

$$nbVSS = \left(1 - \frac{bCOD}{pCOD}\right) \cdot VSS$$

$$\frac{bpCOD}{pCOD} = \frac{\left(\frac{bCOD}{BOD}\right) (BOD - sBOD)}{COD - sCOD}$$

$$\frac{bpCOD}{pCOD} = \frac{1,6(BOD - sBOD)}{COD - sCOD} = \frac{1,6 \cdot (140 - 70)}{300 - 132} = 0,67$$

$$nbVSS = (1 - 0,67) \cdot 60 = 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$iTSS = TSS - VSS = 70 - 60 = 10 \text{ g/m}^3$$

2) Određivanje produkcije biomase.

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(\mu_m - k_d) - 1}$$

Vrednosti iz tabela:

$$K_s = 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Korigovanje koeficijenata u odnosu na temperaturu otpadne vode:

$$\mu_{m,T} = \mu_m \theta^{(T-20)}$$

$$\mu_{m,12^{\circ}\text{C}} = 6,0 \cdot 1,07^{(12-20)} = 3,5 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

$$k_{d,T} = k_{20} \theta^{(T-20)}$$

$$k_{d,12^{\circ}\text{C}} = 0,12 \cdot 1,04^{(12-20)} = 0,088 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

Zamenom koeficijenata u jednačinu za izračunavanje koncentracije supstrata na izlazu iz aeracionog bazena, dobija se:

$$S = \frac{20 \cdot (1 + 0,088 \cdot 5)}{5 \cdot (3,5 - 0,088) - 1} = 1,8 \frac{\text{g bCOD}}{\text{m}^3}$$

a produktivnost biomase je jednaka:

$$P_{x,bio} = \frac{22464 \cdot 0,40 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,088 \cdot 5} + \frac{0,15 \cdot 0,088 \cdot 22464 \cdot 0,4 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} \cdot 5}{1 + 0,088 \cdot 5}$$

$$P_{x,bio} = 1478 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

3) Određivanje mase VSS i TSS u aeracionom bazenu.

$$M = P_x \cdot \theta$$

$$P_{x,vss} = 1478 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + Q(nbVSS)$$

$$P_{x,vss} = 1478 + 22464 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,vss} = 1927,3 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$P_{x,tss} = 1478 \cdot \frac{1}{0,85} + Q(nbVSS) + Q(TSS_0 - VSS_0)$$

$$P_{x,tss} = 1738,8 + 449,3 + 22464 \cdot 10 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{X,TSS} = 2412,7 \frac{kg}{d}$$

$$X_{MLVSS} \cdot V = P_{X,VSS} \cdot \theta = M_{MLVSS}$$

$$M_{MLVSS} = 1927,3 \cdot 5 = 9637 \text{ kg}$$

$$X_{MLSS} \cdot V = P_{X,TSS} \cdot \theta = M_{MLSS}$$

$$M_{MLSS} = 2412,7 \cdot 5 = 12064 \text{ kg}$$

- 4) Određivanje zapremine aeracionog bazena, hidrauličkog vremena zadržavanja i koncentracije *MLVSS* u aeracionom bazenu.

$$X_{MLSS} \cdot V = 25405 \text{ kg}$$

$$X_{MLSS} = 3000 \text{ g/m}^3$$

$$V = \frac{25405 \text{ kg}}{3000 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^3}} = 4021 \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{4021 \text{ m}^3 \cdot \frac{24h}{d}}{22464 \frac{m^3}{d}} = 4,3 \text{ h}$$

$$Udeo \ VSS = \frac{M_{MLVSS}}{M_{MLSS}} = \frac{9637 \text{ kg}}{12064 \text{ kg}} = 0,80$$

$$X_{MLVSS} = 0,80 \cdot 3000 = 2400 \frac{g}{m^3}$$

- 5) Određivanje *F/M* odnosa i *BOD* zapreminskog opterećenja.

$$\frac{F}{M} = \frac{QS_0}{XV}$$

$$\frac{F}{M} = \frac{22464 \frac{m^3}{d} \cdot 140 \frac{g}{m^3}}{2400 \frac{g}{m^3} \cdot 4021 m^3} = 0,33 \frac{g}{g \cdot d} = 0,33 \frac{kg}{kg \cdot d}$$

$$BOD \text{ opterećenje} = \frac{QS_0}{V}$$

$$\begin{aligned} \text{BOD opterećenje} &= \frac{22464 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 140 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}}}{4021 \text{m}^3} \\ &= 0,78 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \end{aligned}$$

6) Stvarni prinos TSS i VSS.

$$\text{Stvarni prinos} = \frac{\text{g TSS}}{\text{g bCOD}} = \frac{\text{kg TSS}}{\text{kg bCOD}}$$

$$P_{X,TSS} = 2412,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Uklonjen bCOD} = Q(S_0 - S)$$

$$\text{Uklonjen bCOD} = 22434 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} = 4991,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$Y_{\text{obs},TSS} = \frac{2412,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{4991,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}} = 0,48 \frac{\text{kg TSS}}{\text{kg bCOD}}$$

$$\frac{\text{VSS}}{\text{TSS}} = 0,8$$

$$Y_{\text{obs},VSS} = 0,48 \frac{\text{g TSS}}{\text{g bCOD}} \cdot 0,80 \frac{\text{g VSS}}{\text{g TSS}} = 0,38 \frac{\text{g VSS}}{\text{g bCOD}}$$

$$Y_{\text{obs},VSS} = 0,38 \frac{\text{g VSS}}{\text{g bCOD}} \cdot 1,6 \frac{\text{g bCOD}}{\text{g BOD}} = 0,61 \frac{\text{g VSS}}{\text{g BOD}}$$

7) Izračunavanje potrebne količine kiseonika.

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{X,bio}$$

$$\begin{aligned} R_0 &= 22464 \cdot (224 - 1,8) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 1478 = 2892,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \\ &= 120,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

8) Izračunavanje potrebnog masenog protoka kiseonika i zapreminskog protoka vazduha pri aeraciji

Maseni protok kiseonika u realnim uslovima rada postrojenja, računa se po sledećoj jednačini:

$$N_D = N_{O_D} \left(\frac{\beta C_{s,T,H} - C_L}{C_{s,20}} \right) (1,024^{T-20}) (\alpha) (F)$$

Pošto je poznata potrošnja kiseonika u realnim uslovima, ($N_D = 120,5 \text{ kg/h}$), da bi se odredio protok vazduha, koji se pri izboru uređaja definiše za normalne uslove i aeraciju u čistoj vodi, potrebno je, na osnovu prethodne jednačine, izračunati koja će to brzina prenosa kiseonika pri standardnim uslovima u čistu vodu N_{O_D} , obezbediti traženu brzinu prenosa kiseonika u realnim uslovima. Na osnovu te vrednosti se onda, prema masenom udelu kiseonika u zapremini vazduha i stepena efikasnosti prenosa, izračunava protok vazduha pri standardnim uslovima i vrši izbor uređaja, koji taj protok može obezbediti.

Određivanje, $C_{s,T,H}$ srednje koncentracije zasićenja rastvorenog kiseonika u čistoj vodi u aeracionom bazenu na temperaturi T i visini H :

$$C_{s,T,H} = (C_{s,T,H}) \frac{1}{2} \left(\frac{P_D}{P_{atm,H}} + \frac{O_e}{21} \right)$$

Vrednosti ravnotežnih koncentracija kiseonika na temperaturama su (tabela 3.10):

$$C_{20^\circ\text{C}} = 9,08 \text{ mg/L}$$

$$C_{12^\circ\text{C}} = 10,77 \text{ mg/L}$$

Određivanje relativnog pritiska na visini od 500 m u odnosu na nultu nadmorsku visinu, tj. stepen umanjena atmosferskog pritiska sa povećanjem visine, računa se po jednačini:

$$\frac{P_{atm,H}}{P_{atm,H=0}} = \exp \left[- \frac{g M (z_b - z_a)}{RT} \right]$$

$$\frac{P_{atm,H}}{P_{atm,H=0}} = \exp \left[- \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 28,97 \frac{\text{kg}}{\text{kg}\cdot\text{mol}} \cdot (500 - 0)\text{m}}{8314 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot (273,15 + 12)\text{K}} \right]$$

$$= 0,94$$

Koncentracija kiseonika na 500 m i 12°C je:

$$C_{s,T,H} = 10,77 \cdot 0,94 = 10,12 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Određivanje atmosferskog pritiska u m vodenog stuba na visini od 500 m:

$$P_{atm,H} = \frac{\left(\frac{P_{atm,H}}{P_{atm,H=0}}\right) P_{atm,H}}{\gamma}$$

$$P_{atm,H} = \frac{0,94 \cdot 101,325 \frac{kN}{m^2}}{9,802 \frac{kN}{m^3}} = 9,72 \text{ m}$$

Izračunavanje koncentracije kiseonika pretpostavljajući da je procenat kiseonika u vazduhu koji napušta aeracioni bazen jednak 19%:

$$C_{s,T,H} = (C_{s,T,H}) \frac{1}{2} \left(\frac{P_{atm,H} + P_{HD}}{P_{atm,H}} + \frac{O_e}{21} \right)$$

$$C_{s,T,H} = 10,12 \frac{mg}{L} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{9,72 \text{ m} + (4,9 - 0,5)m}{9,72 \text{ m}} + \frac{19}{21} \right]$$

$$= 11,93 \frac{mg}{L}$$

Izračunavanje N_{O_D} :

$$N_{O_D} = N_D \left[\frac{C_{s,20}}{\alpha F (\beta C_{s,T,H} - C_L)} \right] (1,024^{20-T})$$

$$N_{O_D} = \frac{120,5 \frac{kg}{h} \cdot 9,08 \frac{g}{m^3} \cdot 1,024^{20-12}}{0,50 \cdot 0,9 \cdot (0,95 \cdot 11,93 \frac{g}{m^3} - 2,0 \frac{g}{m^3})} = 315 \frac{kg}{h}$$

Izračunavanje protoka vazduha:

$$\text{Protok vazduha, } \frac{kg}{min}$$

$$= \frac{(N_{O_D}, \frac{kg}{h})}{[E \cdot (60 \text{ min/h})(kgO_2/m^3 \text{ vazduha})]}$$

Korišćenjem vrednosti iz tabele za gustinu vazduha na 12 °C i pritisku od 95,2 kPa (0,94 · 101,325 kPa) iznosi 1,1633 kg/m³. Odgovarajuća količina kiseonika po masi je 0,270 (0,2318 · 1,1633 kg/m³), pa se dobija da je potreban protok vazduha:

$$\text{Protok vazduha, } \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = \frac{(315 \frac{\text{kg}}{\text{h}})}{[0,35 \cdot (60 \text{ min/h})(0,270 \text{ kgO}_2/\text{m}^3 \text{ vazduha})]} = 55,5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

B) Uklanjanje BOD sa nitrifikacijom

- 1) Prvi koraci su isti kao kod uklanjanja isključivo BOD, (zadatak pod A), izuzetak je vreme zadržavanja ćelija koje mora ponovo biti određeno. Brzina nitrifikacije će kontrolisati ceo proces jer nitrifikacione bakterije rastu mnogo sporije od heterotrofnih bakterija koje uklanjaju organski ugljenik.

Na početku je potrebno izračunati specifičnu brzinu rasta nitrifikacionih bakterija primenom jednačine:

$$\mu_n = \left(\frac{\mu_{mn} N}{K_n + N} \right) \left(\frac{DO}{K_o + DO} \right) - k_{dn}$$

Određivanje kinetičkih parametara za temperaturu otpadne vode od 12 °C:

$$\mu_{mn,12^\circ\text{C}} = 0,75 \cdot 1,07^{(12-20)} = 0,44 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

$$K_{n,12^\circ\text{C}} = 0,74 \cdot 1,053^{(12-20)} = 0,49 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$k_{dn,12^\circ\text{C}} = 0,08 \cdot 1,04^{(12-20)} = 0,06 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

Dane vrednosti: $N = 0,50 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, $DO = 2,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, $K_o = 0,50 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

Zamenom izračunatih i datih vrednosti u jednačinu za izračunavanje specifične brzine rasta nitrifikacionih bakterija, dobija se:

$$\mu_n = \left(\frac{0,44 \cdot 0,50}{0,49 + 0,50} \right) \left(\frac{2,0}{0,50 + 2,0} \right) - 0,06 = 0,12 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

- 2) Izračunavanje teoretskog i stvarnog vremena zadržavanja ćelija, θ .

Izračunavanje teoretskog θ :

$$\theta = \frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{0,12} = 8,33 \text{ d}$$

Izračunavanje stvarnog θ :

$$FS = \frac{TKN \text{ max}}{TKN \text{ srednje}} = 1,5$$

$$\text{Stvarno } \theta = FS \cdot \text{teoretsko } \theta$$

$$\text{Stvarno } \theta = 1,5 \cdot 8,33 = 12,5 \text{ d}$$

3) Izračunavanje produkcije biomase.

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})\theta}$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(\mu_m - k_d) - 1}$$

$$S = \frac{20 \cdot (1 + 0,088 \cdot 12,5)}{12,5 \cdot (3,5 - 0,088) - 1} = 1,0 \frac{\text{g bCOD}}{\text{m}^3}$$

Za sada je potrebno pretpostaviti da je $NO_x \approx 80\%$ TKN pošto bilans azota ne može biti još urađen. Greška u ovoj pretpostavci je mala pošto je prinos nitrifikacionih bakterija mali pa je i mali njihov udeo u ukupnoj MLVSS koncentraciji.

$$NO_x = 0,80 \cdot 35 = 28 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} P_{X,bio} &= \frac{22464 \cdot 0,40 \cdot (224 - 1,0) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,088 \cdot 12,5} \\ &+ \frac{0,15 \cdot 0,088 \cdot 0,40 \cdot 22464 \cdot (224 - 1,0) \cdot 10^{-3}}{1 + 0,088 \cdot 12,5} \\ &+ \frac{22464 \cdot 0,12 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,06 \cdot 12,5} \end{aligned}$$

$$P_{X,bio} = 1154,7 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

4) Izračunavanje količine azota oksidovane do nitrata.

Količina oksidovanog azota se može dobiti korišćenjem bilansa azota:

$$NO_x = TKN - N_e - 0,12 \frac{P_{x,bio}}{Q}$$

$$NO_x = 35 \frac{g}{m^3} - 0,50 \frac{g}{m^3} - 0,12 \frac{g N}{g bio} \cdot 1154,7 \frac{kg}{d} \cdot 10^3 \frac{g}{kg} \cdot 22464 \frac{m^3}{d} = 28,3 \frac{g}{m^3}$$

5) Izračunavanje koncentracije mase i koncentracije VSS i TSS u aeracionom bazenu.

$$M = P_x \cdot \theta$$

$$P_{x,vss} = 1154,7 \frac{kg}{d} + Q(nbVSS)$$

$$P_{x,vss} = 1154,7 + 22464 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,vss} = 1604,0 \frac{kg}{d}$$

$$P_{x,tss} = 1154 \cdot \frac{1}{0,85} + Q(nbVSS) + Q(TSS_0 - VSS_0)$$

$$P_{x,tss} = 1358,5 + 449,3 + 22464 \cdot 10 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{x,tss} = 2032,4 \frac{kg}{d}$$

$$X_{MLVSS} \cdot V = P_{x,vss} \cdot \theta = M_{MLVSS}$$

$$M_{MLVSS} = 11604,0 \cdot 12,5 = 20050 \text{ kg}$$

$$X_{MLSS} \cdot V = P_{x,tss} \cdot \theta = M_{MLSS}$$

$$M_{MLSS} = 2032,4 \cdot 12,5 = 25405 \text{ kg}$$

6) Izračunavanje zapremine aeracionog bazena, hidrauličkog vremena zadržavanja i koncentracije MLSS.

$$X_{MLSS} \cdot V = 25405 \text{ kg}$$

$$X_{MLSS} = 3000 \frac{g}{m^3}$$

$$V = \frac{25405 \text{ kg} \cdot 10^3 \frac{g}{kg}}{3000 \frac{g}{m^3}}$$

$$V = 8468 \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{8468 \text{ m}^3 \cdot \frac{24h}{d}}{22464 \frac{m^3}{d}} = 9,0 \text{ h}$$

$$Udeo \ VSS = \frac{M_{MLVSS}}{M_{MLSS}} = \frac{20050 \text{ kg}}{25405 \text{ kg}} = 0,79$$

$$X_{MLVSS} = 0,79 \cdot 3000 = 2370 \frac{g}{m^3}$$

7) Određivanje F/M odnosa i BOD zapreminskog opterećenja.

$$\frac{F}{M} = \frac{QS_0}{XV}$$

$$\frac{F}{M} = \frac{22464 \frac{m^3}{d} \cdot 140 \frac{g}{m^3}}{2370 \frac{g}{m^3} \cdot 8466 m^3} = 0,16 \frac{g}{g \cdot d}$$

$$BOD \text{ opterećenje} = \frac{QS_0}{V} = \frac{kg \ BOD}{m^3 \cdot d}$$

$$BOD \text{ opterećenje} = \frac{22464 \frac{m^3}{d} \cdot 140 \frac{g}{m^3} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{g}}{8466 m^3} \\ = 0,37 \frac{kg}{m^3 \cdot d}$$

8) Stvarni prinos TSS i VSS.

$$Stvarni \ prinos = \frac{g \ TSS}{g \ bCOD} = \frac{kg \ TSS}{kg \ bCOD}$$

$$P_{x,TSS} = 2032,4 \frac{kg}{d}$$

$$Uklonjen \ bCOD = Q(S_0 - S)$$

$$\text{Uklonjen } bCOD = 22434 \cdot (224 - 1,0) \cdot 10^{-3} = 5009,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$Y_{obs,TSS} = \frac{2032,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{5009,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}} = 0,41 \frac{\text{kg TSS}}{\text{kg bCOD}}$$

$$\frac{VSS}{TSS} = 0,8$$

$$Y_{obs,VSS} = 0,41 \frac{\text{g TSS}}{\text{g bCOD}} \cdot 0,80 \frac{\text{g VSS}}{\text{g TSS}} = 0,328 \frac{\text{g VSS}}{\text{g bCOD}}$$

$$Y_{obs,VSS} = 0,328 \frac{\text{g VSS}}{\text{g bCOD}} \cdot 1,6 \frac{\text{g bCOD}}{\text{g BOD}} = 0,52 \frac{\text{g VSS}}{\text{g BOD}}$$

9) Izračunavanje potrebne količine kiseonika.

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42P_{x,bio} + 4,33Q(NO_x)$$

$$\begin{aligned} R_0 &= 22464 \cdot (224 - 1,0) \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot 1154,7 + 4,33 \\ &\quad \cdot 22464 \cdot 28,3 \cdot 10^{-3} = 6122,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \\ &= 255,1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

10) Aeracija-izračunavanje potrebnog masenog protoka kiseonika i zapreminskog protoka vazduha.

$$N_{O_D} = N_D \left[\frac{C_{s,20}}{\alpha F (\beta C_{s,T,H} - C_L)} \right] (1,024^{20-T})$$

$$N_{O_D} = \frac{255,1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 9,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 1,024^{20-12}}{0,65 \cdot 0,9 \cdot (0,95 \cdot 11,93 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 2,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^3})} = 512,9 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Izračunavanje protoka vazduha:

$$\begin{aligned} \text{Protok vazduha, } \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \\ &= \frac{(512,9 \frac{\text{kg}}{\text{h}})}{[0,35 \cdot (60 \text{ min/h})(0,270 \text{ kg O}_2/\text{m}^3 \text{ vazduha})]} = 90,5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \end{aligned}$$

11) Provera alkaliteta.

Bilans alkaliteta:

Alkalitet da bi se održao pH na 7
= Alk. u influentu
– Upotrebljen alk. + Alk. koji je potrebno dodati

Alkalitet u influentu: $140 \frac{g}{m^3}$ kao $CaCO_3$

Količina azota konvertovanog u nitrate: $NO_x = 28,3 \frac{g}{m^3}$

Alkalitet uporebljen za nitrifikaciju

$$= 7,14 \frac{g CaCO_3}{g NH_4-N} \cdot 28,3 \frac{g}{m^3} = 202 \frac{g}{m^3} CaCO_3$$

Rezidualna koncentracija alkaliteta koja je potrebna da bi se pH održao u opsegu 6,8 – 7,0 je od 70 do $80 \frac{g}{m^3}$ kao $CaCO_3$.
Za ovaj primer uzeće se vrednost od $80 \frac{g}{m^3}$.

Zamenom vrednosti u bilansnu jednačinu za alkalitet dobija se:

$$80 \frac{g}{m^3}$$

= Alk. u influentu
– Upotrebljen alk. + Alk. koji je potrebno dodati

$$80 \frac{g}{m^3} = 140 \frac{g}{m^3} - 202,6 \frac{g}{m^3} + \text{Alk. koji je potrebno dodati}$$

$$\text{Alk. koji je potrebno dodati} = 142,6 \frac{g}{m^3} \text{ kao } CaCO_3$$

$$\begin{aligned} \text{Alk. koji je potrebno dodati} &= 22464 \frac{m^3}{d} \cdot 142,6 \frac{g}{m^3} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{g} \\ &= 3203 \frac{kg}{d} \text{ kao } CaCO_3 \end{aligned}$$

Sada će biti određen potreban alkalitet u obliku natrijum bikarbonata, zbog toga što se sa njegovom upotrebom stvara manje taloga nego pri upotrebi kreča.

Dobija se da je potrebna količina $Na(HCO_3)$:

Ekvivalent težine $CaCO_3 = 50 \text{ g/ekvivalent}$

Ekvivalent težine $Na(HCO_3) = 84 \text{ g/ekvivalent}$

$$\begin{aligned} \text{Potreban } Na(HCO_3) &= \frac{(3203 \frac{\text{kg}}{\text{d}} CaCO_3) \cdot (84 \frac{\text{g } NaHCO_3}{\text{ekv.}})}{(50 \frac{\text{g } CaCO_3}{\text{ekv.}})} \\ &= 5380 \frac{\text{kg}}{\text{d}} NaHCO_3 \end{aligned}$$

12) Izračunavanje koncentracije BOD u efluentu.

$$BOD = sBOD_e + \left(\frac{\text{g } BOD}{1,42 \text{ g } VSS} \right) \left(\frac{0,85 \text{ g } VSS}{\text{g } TSS} \right) \left(TSS, \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right)$$

Pretpostaviti: $sBOD_e = 3,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

$$TSS = 10 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$BOD = 3,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + 0,70 \cdot 0,80 \cdot 10 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 8,95 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

13) Projektovanje sekundarnog taložnika (za oba slučaja, za uklanjanje BOD i za uklanjanje BOD sa nitrifikacijom).

Određivanje recirkulacionog odnosa:

$$(Q + Q_r)X = Q_r X_r$$

(pretpostaviti da količina otpadnog mulja nije značajna)

$$R = \frac{Q_r}{Q}$$

$$R X_r = (1 + R)X$$

$$R = \frac{X}{X_r - X}$$

Pretpotaviti: $X_r = 8000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

$$R = \frac{3000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{(8000 - 3000) \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} = 0,60$$

Pretpostaviti da je hidrauličko opterećenje $22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ pri srednjem protoku kroz sekundarni taložnik. Opseg hidrauličkih opterećenja sekundarnog taložnika se kreće od 16 do $28 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

$$\text{Površina} = \frac{22464 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{22 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} = 1021 \text{ m}^2$$

Uzeće se 3 taložnika, po jedan za svaki aeracioni bazen, pa površina jednog taložnika iznosi:

$$\frac{\text{Površina}}{\text{taložnik}} = 312 \text{ m}^2$$

$$\text{Prečnik taložnika} = 20,8 \text{ m uzeti } 20 \text{ m}$$

Provera opterećenja suspendovanim čvrstim materijama:

$$\text{Opterećenje čvrstim materijama} = \frac{\text{kg TSS}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$\begin{aligned} \text{Opterećenje čvrstim materijama} &= \frac{(Q + Q_r)X_{MLSS}}{A} \\ &= \frac{(1 + R)QX_{MLSS}}{A} \end{aligned}$$

$$A = \text{površina taložnika, m}^2 = \frac{20^2 \cdot \pi}{4} \cdot 3 = 942 \text{ m}^2$$

Opterećenje čvrstim materijama

$$= \frac{(1 + 0,6) \cdot 22464 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24\text{h}} \cdot 3000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}}}{942 \text{ m}^2}$$

$$\text{Opterećenje čvrstim materijama} = 4,8 \frac{\text{kg MLSS}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

14) Zbirni pregled izračunatih parametara.

Projektni parametar	Jedinice	Uklanjanje samo BOD (deo pod A)	Uklanjanje BOD sa nitrifikacijom (deo pod B)
Srednji protok otpadne vode	m^3/d	22464	22464
Srednje BOD opterećenje	kg/d	3145	3145
Srednje TKN opterećenje	kg/d	786	786
Aerobno θ	d	5,0	12,5
Aeracioni bazeni	Broj	3	3
Zapremina aeracionog bazena	m^3	1340	2822
Hidrauličko vreme zadržavanja, τ	h	4,3	9,0
MLSS	g/m^3	3000	3000
MLVSS	g/m^3	2400	2370
F/M	$g/g \cdot d$	0,33	0,16
Opterećenje BOD	$kgBOD / m^3 \cdot d$	0,78	0,37
Produkcija mulja	kg/d	2413	2032
Stvarni prinos	$kg TSS / kg bCOD$	0,77	0,65
	$kg TSS / kg BOD$	0,61	0,52
Potreban kiseonik	kg/h	120,5	255,1
Protok vazduha pri srednjem protoku otpadne vode	m^3/min	55,5	90,5
Recirkulacioni odnos, R	-	0,60	0,60
Hidrauličko opterećenje sekundarnog taložnika	$m^3/m^2 \cdot d$	24	24
Sekundarni taložnik	Broj	3	3
Prečnik sekundarnog taložnika	m	20	20
Dodatak alkaliteta kao $Na(HCO_3)$	kg/d	-	5380
BOD u efluentu	g/m^3	< 30	8,95
TSS_e	g/m^3	< 30	10
NH_4 u efluentu	g/m^3	28,8	$\leq 0,5$

Sekundarno taloženje

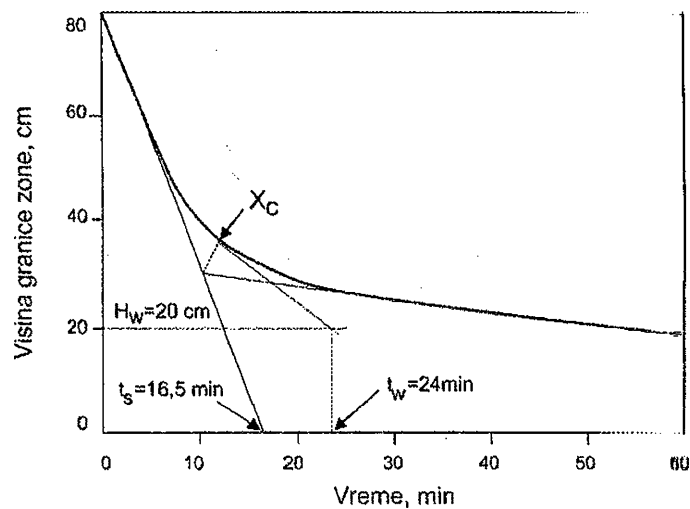
Zadatak 1. Analize na koloni za taloženje se obavljaju sa otpadnim muljem čija je početna koncentracija čvrstih materija 3500 mg/L . Kriva taloženja je prikazana na slici. Poželjno je da se ovaj mulj zgusnu na koncentraciju 14000 mg/L . Ulazni protok mulja je $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Odrediti površinu potrebnu za zgušnjavanje, brzinu taloženja i opterećenje česticama. H_0 je jednako 80 cm .

Rešenje:

Visina ispod koje se čestice nalaze na željenoj koncentraciji je jednaka:

$$H_w = \frac{X_0 H_0}{X_w}$$
$$H_w = \frac{3500 \text{ mg}}{L} \cdot 80 \text{ cm} \cdot \frac{L}{14000 \text{ mg}} = 20 \text{ cm}$$

Sledeći korak je crtanje tagenti na krivu taloženja u oblastima zonalnog taloženja i stešnjenog taloženja, slika.



Presekom ugla koje formiraju ove dve tangente dobija se kritična koncentracija X_c . Vrednost t_u se određuje povlačenjem vertikalne linije od tačke gde se seku tangente, od koncentracije X_c do vremenske ose i povlačenjem horizontalne linije od dubine H_u (20 cm) do vremenske ose. Kao što je prikazano na slici, vreme t_u je jednako 24 min.

Površina potrebna za zgušnjavanje je:

$$A = \frac{Qt_w}{H_0}$$

$$A = \frac{0.02 \text{ m}^3}{\text{s}} \cdot 24 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{1}{80 \text{ cm}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 36 \text{ m}^2$$

Nakon izračunavanja površine za zgušnjavanje mulja, neophodno je da se osigura da je ova površina adekvatna za bistrenje. Brzina taloženja, v_s se dobija deljenjem dubine (visine) kolone sa vremenom t_s , gde tangenta regiona zonalnog taloženja seče apcisu. Sa slike se vidi da je to na 16,5 min, pa je:

$$V_s = \frac{80}{16,5 \cdot 60} = 0.08 \text{ cm/s}$$

Površina za bistrenje je tada jednaka:

$$A = \frac{Q}{V_s} = \frac{0.02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0008 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 25 \text{ m}^2$$

Ova površina je manja od površine za zgušnjavanje, pa je projektovanje ovog sistema uslovljeno površinom za zgušnjavanje.

Opterećenje čvrstim materijama je jednako:

$$\begin{aligned}
 & \text{Opterećenje čvrstim materij} \\
 &= \frac{0.02 \text{ m}^3}{1000 \frac{\text{s}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{3500 \text{ mg}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{mg}}} \cdot \frac{1}{36 \text{ m}^2} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{\text{d}} \\
 &= 168000 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} = 168 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}
 \end{aligned}$$

Zadatak 2. Na osnovu datih podataka u tabeli o taloženju biološkog mulja iz postrojenja sa aktivnim muljem, izračunati maksimalnu koncentraciju suspendovanih materija koja može biti dostignuta ako je površinska brzina kroz sekundarni taložnik, $Q + Q_r$, nepromenjena i iznosi $25 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, a recirkulacioni protok Q_r čini 40 % ulaznog protoka. Iz sekundarnog taložnika se vraćaju biološke čvrste materije u aeracioni bazen da bi se održala potrebna koncentracija bioloških materija u njemu. Pretpostaviti da je količina otpadnog mulja u ovom primeru zanemarljiva.

<i>MLSS, g/m³</i>	Početna brzina taloženja, <i>V</i> <i>m/h</i>
2 000	4,27
3 000	3,51
4 000	2,76
5 000	2,13
6 000	1,28
7 000	0,91
8 000	0,67
9 000	0,49
10 000	0,37
15 000	0,15
20 000	0,07
30 000	0,03

Rešenje:

- 1) Prvo je potrebno formirati tabelu sa vrednostima fluksa čvrstih materija koje odgovaraju datim koncentracijama čvrstih materija, koristeći jednačinu da je fluks:

$$G = X \cdot V \cdot 10^{-3} \frac{kg}{g}$$

pa se dobija sledeća tabela:

MLSS, g/m ³	Fluks čvrstih materija, kg/m ² · h
2 000	8,54
3 000	10,53
4 000	11,03
5 000	10,65
6 000	7,68
7 000	6,37
8 000	5,36
9 000	4,41
10 000	3,70
15 000	2,25
20 000	1,40
30 000	0,81

Dobijene vrednosti označavaju liniju gravitacionog fluksa.

- 2) Određivanje brzine isticanja mulja iz sekundarnog taložnika, vrši se na osnovu poznatog odnosa recirkulacije i površinske brzine u sekundarnom taložniku, pa je:

$$V_b = \left[\frac{0,4Q}{Q + 0,4Q} \right] \cdot 25 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} = 7,14 \frac{m}{d} = 0,30 \frac{m}{h}$$

Sada se na osnovu izračunate brzine isticanja mulja iz taložnika, određuje fluks čestica zbog istakanja mulja, koji je prava linija sa nagibom koji određuje izračunata brzina $V_b = 0,3 m/h$, po jednačini:

$$G_w = X_i V_b \cdot 10^{-3} \frac{kg}{g}$$

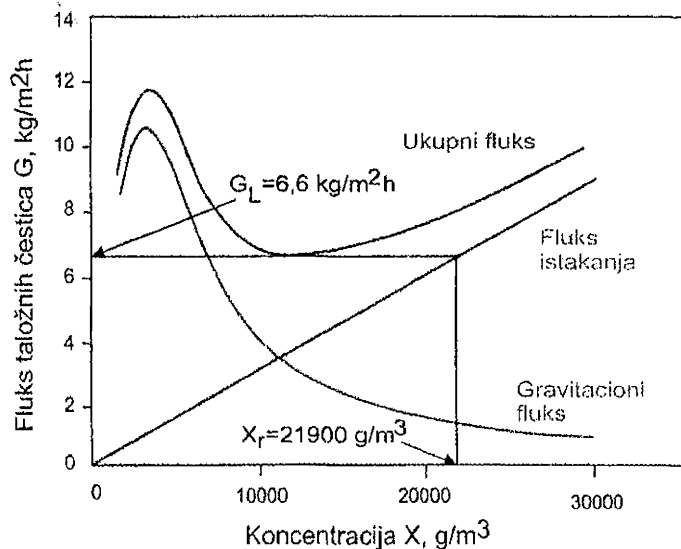
Gde se dobijaju sledeći podaci:

<i>MLSS, g/m³</i>	<i>Fluks čvrstih materija, kg/m² · h</i>
2 000	0,6
3 000	0,9
4 000	1,2
5 000	1,5
6 000	1,8
7 000	2,1
8 000	2,4
9 000	2,7
10 000	3,0
15 000	4,5
20 000	6,0
30 000	9,0

Sabiranjem dve prethodno određene vrednosti fluksa, dobija se vrednost za ukupni fluks čestica mulja u taložniku:

<i>MLSS, g/m³</i>	<i>Fluks čvrstih materija, kg/m² · h</i>
2 000	9,14
3 000	11,43
4 000	12,23
5 000	12,15
6 000	9,48
7 000	8,47
8 000	7,76
9 000	7,11
10 000	6,70
15 000	6,75
20 000	7,40
30 000	9,81

Na osnovu ovih tabelarnih vrednosti crta se dijagram sa linijama za sva tri fluksa:



Na osnovu krive ukupnog fluksa čvrstih materija, vidi se da je vrednost najniže tačke, tj. vrednost limitirajućeg fluksa jednaka:

$$G_L = 6,6 \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

Ovo znači da u taložnik ne sme ući veća količina čestica od ove vrednosti, jer bi u tom slučaju došlo do nagomilavanja čestica u njemu i vremenom do prekida rada taložnika.

Takođe na osnovu krive fluksa čvrstih materija, iz preseka linije sa limitirajućim fluksom i prave koja označava fluks istakanja iz taložnika, dobija se da je maksimalna moguća koncentracija čvrstih materija u izlaznoj (recirkulacionoj) struji sekundarnog taložnika jednaka 21900 g/m³.

Na osnovu poznate vrednosti za koncentraciju u recirkulacionoj struji, može se odrediti maksimalna koncentracija čvrstih materija koja može biti održana u reaktoru.

$$QX_0 + Q_r X_r = (Q + Q_r)X$$

Pretpostavljajući:

$$X_0 = 0, X_0 \ll X_r \text{ i } \frac{Q_r}{Q} = 0,4$$

Zamenom vrednosti dobija se da je *MLSS* koncentracija u reaktoru jednaka:

$$0,4Q \cdot 21900 \frac{g}{m^3} = (1 + 0,4)QX$$

$$X_{MLSS} = 6257 \frac{g}{m^3}$$

Zadatak 3. U sistemu sa aktivnim muljem, nakon aeracionog bazena postavljena su dva sekundarna taložnika. Protok otpadne vode kroz sistem iznosi $15070 \text{ m}^3/d$. Izvršen je test taloženja čvrstih materija, koji je prikazan u tabeli. Odrediti radne parametre ovog sistema.

Uslovi projektovanja:

- 1) Prečnik oba postavljena sekundarna taložnika iznosi 20 m.
- 2) Sa oba taložnika u funkciji, željena koncentracija *MLSS* je 3500 mg/L .
- 3) Odrediti da li je moguće da taložnik radi sa koncentracijama u izlaznoj struji mulja od 10, 12 i 14 g/L i odrediti recirkulacioni odnos.
- 4) Odrediti *MLSS* koncentraciju kada je u funkciji samo jedan taložnik korišćenjem koncentracije čvrstih materija u recirkulaciji od 12 g/L .
- 5) Odrediti opterećenje čvrstim materijama sekundarnog taložnika kada se koristi koncentracija u izlaznom toku od 12 g/L i *MLSS* od 3500 g/m^3 .
- 6) Rezultati testa:

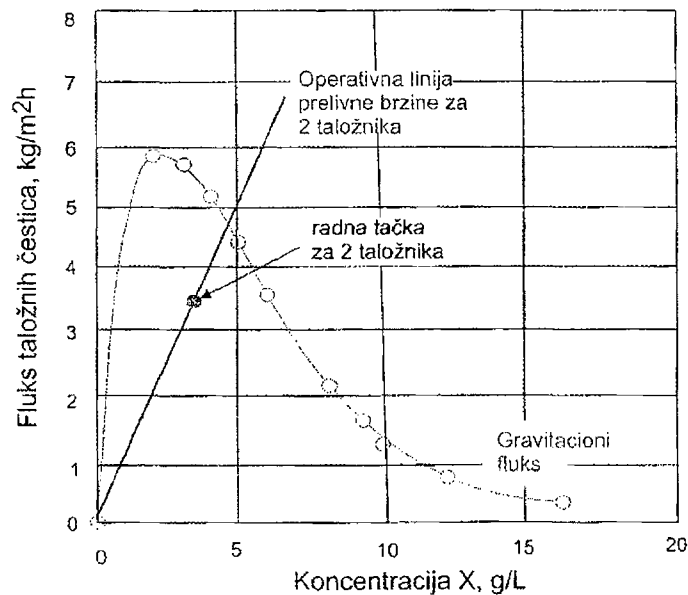
<i>MLSS, g/m³</i>	<i>Početna brzina taloženja, m/h</i>
2 000	2,90
3 000	1,90
4 000	1,30
5 000	0,90
6 000	0,60
8 000	0,26
9 000	0,17
10 000	0,12
12 000	0,05
16 000	0,01

Rešenje:

1) Određivanje ravnotežne krive fluksa korišćenjem jednačine:

$$G = X_i V_i$$

<i>X_i, g/L</i>	<i>V_i, m/h</i>	<i>G, kg/m² · h</i>
2,0	2,90	5,80
3,0	1,90	5,70
4,0	1,30	5,20
5,0	0,90	4,50
6,0	0,60	3,60
8,0	0,26	2,08
9,0	0,17	1,53
10,0	0,12	1,20
12,0	0,05	0,60
16,0	0,01	0,16



2) Određivanje površine sekundarnog taložnika:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{20^2 \pi}{4} = 314 \text{ m}^2$$

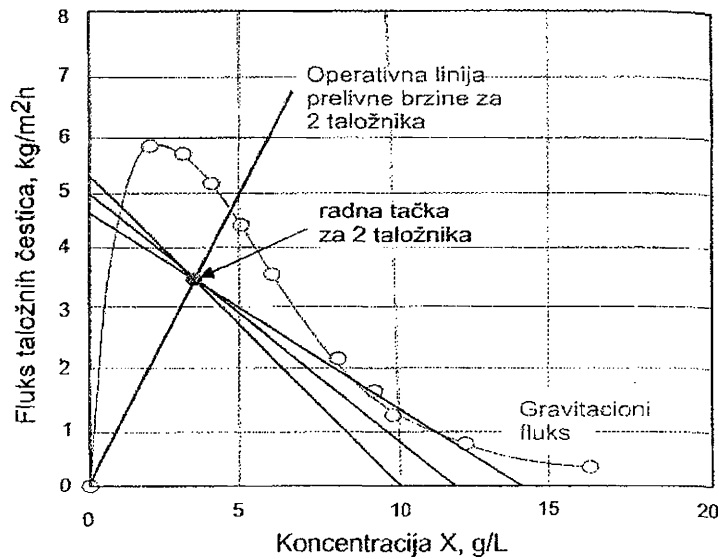
$$\text{Ukupna površina (2 taložnika)} = 2 \cdot 314 = 628 \text{ m}^2$$

Određivanje prelivne brzine kada je koncentracija mulja u izlaznoj struji $X = 3500 \text{ mg/L}$:

$$G_Q = \frac{QX}{A} = \frac{15070 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \text{ h}} \cdot 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{628 \text{ m}^2} = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

3) Analiza za koncentracije od 10,12 i 14 g/L.

Crta se linija koja preseca 14 g/L na x osi i prolazi kroz radnu tačku, a y osu preseca u $4,67 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, zbog ovoga ova operativna linija nije moguća jer prelazi ravnotežnu krivu fluksa. Na isti način se crtaju linije za koncentracije od 10 i 12 g/L, koje prolaze ispod ravnotežne krive fluksa pa su zato oba ova uslova izvodljiva.



Određivanje recirkulacionog odnosa, R , za koncentraciju od 10 g/L

Potrebno je odrediti nagib operativne linije sa dijagrama. Odsečak na x osi je $5,38 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, a nagib je negativan i jednak izlaznoj brzini mulja, m/h .

$$\text{Nagib operativne linije} = \frac{(5,38 - 0) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}}{(0 - 10) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = -0,538 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$\text{Izlazna brzina mulja} = -\left(-0,538 \frac{\text{m}}{\text{h}}\right) = 0,538 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$\text{Prelivna brzina taložnika} = \frac{15070 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}}}{628 \text{ m}^2} = 1,0 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$\text{Recirkulacioni odnos} = \frac{0,538 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{1 \frac{\text{m}}{\text{h}}} = 0,538$$

Provera recirkulacionog odnosa, R , za 10 g/L korišćenjem bilansa:

$$Q_{r,z} X_r = (Q + Q_r) X$$

$$X_r R = (1 + R)X$$

$$R = \left(\frac{X_r}{X} - 1 \right)^{-1} = \left(\frac{10 \text{ g/L}}{3,5 \text{ g/L}} - 1 \right)^{-1} = 0,538$$

Izračunavanje recirkulacionog odnosa za koncentraciju od 12 g/L, korišćenjem prethodne procedure:

$$\text{Izlazna brzina mulja} = \frac{(4,94 - 0) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}}{(0 - 12) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,41 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$R = 0,41$$

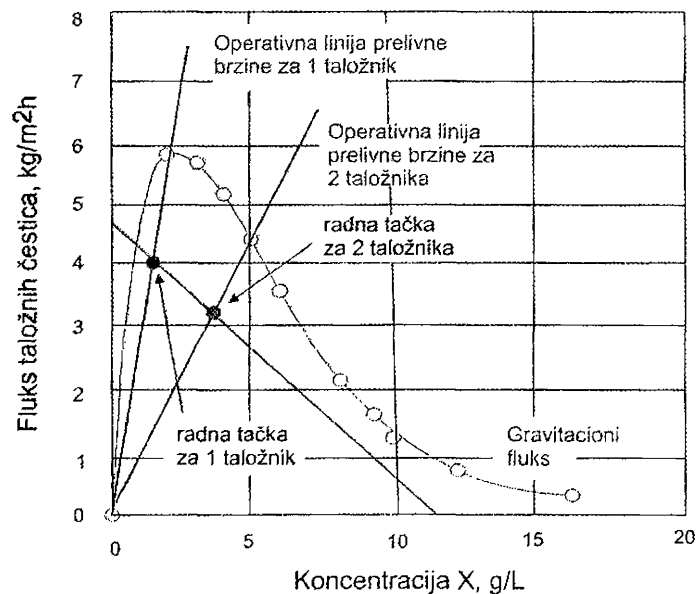
4) Odrediti koja je koncentracija *MLSS* moguća kada je u upotrebi samo jedan taložnik a koncentracija mulja u izlaznoj struji iznosi 12 g/L.

Korišćenjem ravnotežne krive za fluks čvrstih materija, nacrtati krivu prelivne operativne brzine za jedan taložnik (slika).

Za $A = 314 \text{ m}^2$ i $X = 2 \text{ g/l}$:

$$G_Q = \frac{15070 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \text{ h}} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{314 \text{ m}^2} = 4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Moguća koncentracija *MLSS* je ona koja je u radnoj tački, gde operativna linija za prelivnu brzinu preseca operativnu liniju za izlaznu brzinu mulja. Sa prethodnog dijagrama se vidi da je u radnoj tački koncentracija *MLSS* jednaka 2,1 g/L (2100 mg/L).



5) Određivanje opterećenja čvrstim materijama.

Za dva taložnika: $A = 628 \text{ m}^2$, $MLSS = 3,5 \frac{\text{g}}{\text{L}}$, $R = 0,41$

$$\text{Opterećenje čvrstim materijama} = \frac{Q(1 + R)X}{A}$$

Opterećenje čvrstim materijama

$$= \frac{15070 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{\text{d}}{24 \text{ h}} \cdot (1 + 0,41) \cdot 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{628 \text{ m}^2}$$

$$\text{Opterećenje čvrstim materijama} = 4,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Za jedan taložnik: $A = 314 \text{ m}^2$

$$\text{Prelivna brzina taložnika} = \frac{15070 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}}}{314 \text{ m}^2} = 2,0 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$\text{Izlazna brzina mulja} = 0,41 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$R = \frac{0,41 \frac{m}{h}}{2,0 \frac{m}{h}} = 0,205$$

Opterećenje čvrstim materijama

$$= \frac{15070 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24h} \cdot (1 + 0,205) \cdot 2,1 \frac{kg}{m^3}}{314 m^2}$$

$$\text{Opterećenje čvrstim materijama} = 5,06 \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

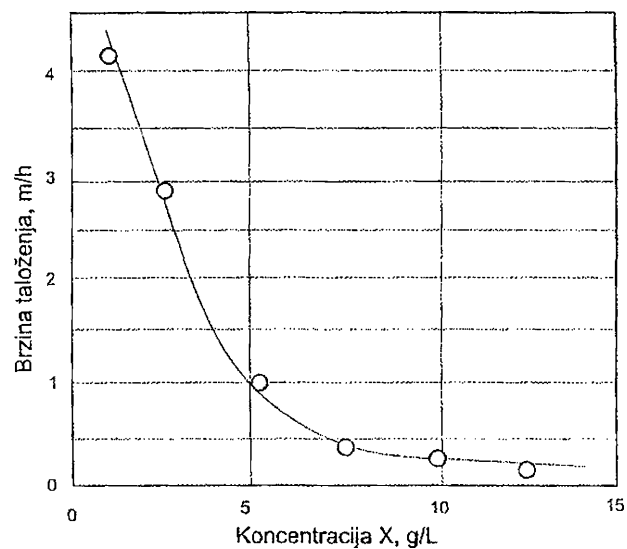
Zadatak 4. Izvršena je serija testova korišćenjem aktivnog mulja čiji su rezultati prikazani u tabeli.

Test	X mg/L	V m/h	G = XV kg/h · m ²
1	12460	0,125	1,56
2	9930	0,249	2,47
3	7450	0,465	3,46
4	5220	1,00	5,22
5	3140	2,94	9,24
6	1580	4,18	6,60

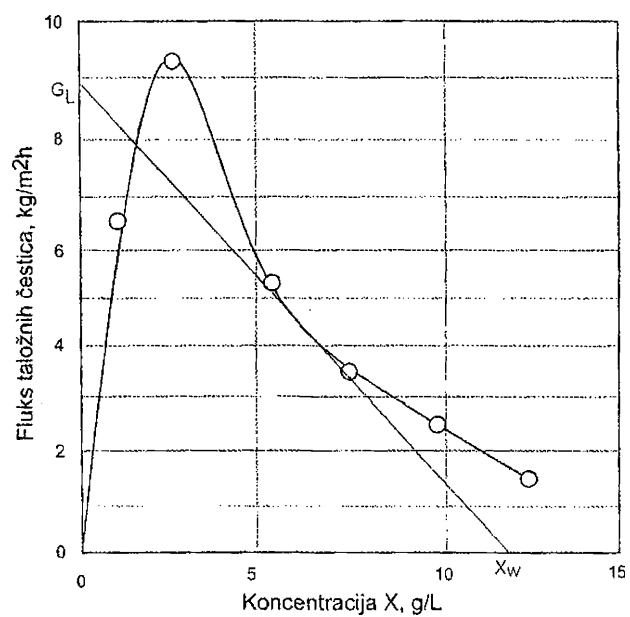
Protok u sekundarni taložnik iznosi 160 L/s , koncentracija MLSS je 2500 mg/L, a koncentracija mulja u izlaznom toku iz sekundarnog taložnika iznosi 12000 mg/L. Odrediti prečnik sekundarnog taložnika.

Rešenje:

Kriva taloženja koja predstavlja brzinu taloženja u zavisnosti od koncentracije čestica je prikazana na dijagramu:



Na osnovu podataka, crta se kriva flukasa koja predstavlja zavisnost fluksa čvrstih materija od njihove koncentracije, i ona je prikazana na dijagramu:



Tagenta na krivoj se povlači iz tačke 12000 mg/L na apcisi, a seče tačku na ordinati u $8,90 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$. Korišćenjem faktora uvećanja dimenzija (*scale up*) od 1,5 dobija se vrednost limitirajućeg fluksa:

$$G_L = \frac{8,90}{1,5} = 5,93 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

Brzina kojom se čestice talože M_t je jednaka:

$$\begin{aligned} M_t = Q_0 X &= 160 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \frac{60 \text{s}}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{min}}{\text{h}} \cdot 2,50 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot \frac{\text{kg}}{1000 \text{g}} \\ &= 1440 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Zahtevana površina taložnika je:

$$A = \frac{M_t}{G_L} = \frac{1440 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{5,93 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}} = 242,8 \text{ m}^2$$

pa traženi prečnik iznosi:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 242,8} = 17,6 \text{ m}$$

Biofiltracija i biodisk

Zadatak 1. U biofiltru sa plastičnom ispunom potrebno je odrediti protok vazduha koji se dovodi na dno filtra i pad pritiska vazduha kroz sloj ispunje. Otpadna voda sa temperaturom od 20°C se raspršava po površini filtra protokom od 220 L/s tj. 19000 m³/d, sa sadržajem organskog zagađenja od 140 mg/L. Opterećenje biofiltra iznosi 0,56 kg BOD/m³ · d, a koeficijent maksimalnog organskog opterećenja je 1,4. Biofiltrar se sastoji od 2 tornja od kojih je svaki prečnika 22 m, a dubina pakovanog sloja iznosi 6,1 m. Korekcionni faktor za pad pritiska pri ulasku u toranj iznosi 1,5, a za pad pritiska u punjenju iznosi 1,3. Temperatura vazduha za datu lokaciju filtra varira od 7 – 28 °C

Rešenje:

- 1) Prvo se odredi potrebna brzina dotoka vazduha kada se uklanja samo ugljenično zagađenje, koristeći jednačinu:

$$R_0 = 20 \frac{kg}{kg} \cdot (0,80e^{-9L_B} + 1,2e^{-0,17L_B}) \cdot PF$$

Prema datim ulaznim podacima je $L_B = 0,56 \text{ kgBOD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$, $PF = 1,4$, pa je zamenom vrednosti:

$$\begin{aligned} R_0 &= 20 \cdot (0,80e^{-9 \cdot 0,56} + 1,2e^{-0,17 \cdot 0,56}) \cdot 1,4 \\ &= 30,69 \frac{kgO_2}{kgBOD} \end{aligned}$$

- 2) Sada je potrebno odrediti brzinu dotoka vazduha kroz filter za date uslove:

Za određivanje brzine dotoka vazduha za standardne uslove, na 20 °C, koristi se jednačina:

$$AR_{20} = \frac{R_0 \cdot Q \cdot S_0 \cdot 3,58}{10^3}$$

Zamenom poznatih vrednosti, dobija se:

$$AR_{20} = \frac{30,69 \frac{kgO_2}{kgBOD} \cdot 19000 \frac{m^3}{d} \cdot 140 \frac{g}{m^3} \cdot 3,58 \frac{m^4}{kgO_2}}{10^3 \cdot 1440 \frac{min}{d}} = 203 \frac{m^3}{d}$$

Pošto se biofiltracija ne odvija na standardnim uslovima, već na temperaturi od 28 °C onda je potrebno izvršiti temperaturnu korekciju po jednačini:

$$AR_T = AR_{20} \left(\frac{273,15 + T_A}{293,15} \right) \left(\frac{1}{P_0} \right)$$

Zamenom vrednosti se dobija:

$$AR_T = 203 \cdot \left(\frac{273,15 + 28}{293,15} \right) \left(\frac{1}{1} \right) = 223,8 \frac{m^3}{min}$$

Takođe, potrebno je izvršiti korekciju zbog toga što struja vazduha nije zasićena, primenom jednačine:

$$AR_{(T>20^\circ C)} = AR_T \left(1 + \frac{T_A - 20}{100} \right)$$

Odnosno zamenom vrednosti za temperaturu na kojoj se proces izvodi od 28°C, dobija se potreban protok vazduha:

$$AR_{(T>20^\circ C)} = 223,8 \frac{m^3}{min} \left(1 + \frac{28 - 20}{100} \right) = 241,7 \frac{m^3}{min}$$

3) Odredjivanje pada pritiska vazduha pri prolazu kroz ispunu filtra se radi na sledeći način:

Prvo se odredi suma svih otpora u biofiltru N_p pomoću jednačine:

$$N_p = 10,33 \cdot H \cdot e^{(1,36 \cdot 10^{-5})(L/A)}$$

U kojoj figuriše odnos L/A koji predstavlja opterećenje biofiltra tečnom fazom, izraženom u kilogramima po času. Na osnovu dnevnog protoka otpadne vode dobija se časovni protok:

$$Q = 1900 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{1 d}{24 h} = 792 \frac{m^3}{h}$$

Površina poprečnog preseka jednog tornja biofiltra je:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{22^2 \cdot 3,14}{4} = 380 m^2$$

Sada se zapreminski protok prevede u maseni i podeli sa poprečnim presekom, čime se dobija odnos:

$$\frac{L}{A} = \frac{Q \cdot \rho}{A} = \frac{792 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{380 \text{ m}^2} = 2080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Iz polaznih podataka je dubina punjenja jednaka $H = 6,1\text{m}$, pa je sada N_p jednako:

$$N_p = 10,33 \cdot 6,1 \cdot e^{(1,36 \cdot 10^{-5}) \left(2080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right)} = 64,8$$

Potom se iz tabelarnih podataka odaberu podaci za korekcionni faktor pada pritiska za punjenje sa suprotnostrujnim tokom od 1,3 i korekcionni faktor za pad pritiska pri ulasku vazduha u biofiltrar od 1,5, pa je stvarni zbir svih otpora jednak:

$$N_p = 1,3 \cdot 1,5 \cdot N_p = 126,3$$

Pad pritiska se računa po jednačini:

$$\Delta P = N_p \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

pri čemu je v površinska brzina vazduha, koja predstavlja odnos protoka vazduha kroz jedan toranj i površine poprečnog preseka tog tornja, pa je u ovom slučaju:

$$v = \frac{AR_{(T>20^\circ\text{C})}}{A} = \frac{241 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{380 \text{ m}^2} = 0,32 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0,005 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sada se može izračunati vrednost pada pritiska:

$$\Delta P = N_p \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 126,3 \frac{\left(0,005 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,00016 \text{ m}$$

Da bi se ova vrednost pretvrla u Paskale, potrebna je gustina vazduha na 28°C , koja je jednaka $\rho_v = 1,175 \text{ kg/m}^3$ pa je:

$$\Delta P = 0,00016 \text{ m} \cdot 1,175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,0018 \text{ Pa}$$

4) Dobijeni rezultat za potreban pad pritiska se uporedi sa vrednošću koju je moguće ostvariti prirodnim provetravanjem, promajom, kroz biofiltrar:

Prvo se odredi srednja logaritamska temperatura T_m , za otpadnu vodu $T_{otp.vode} = 28^\circ\text{C}$ i vazduha $T_{vaz.} = 20^\circ\text{C}$, pa je:

$$T_m = \frac{(T_{otp.vode} - T_{vaz.})}{\ln \frac{T_{otp.vode}}{T_{vaz.}}} = \frac{(28 - 20)}{\ln \frac{28}{20}} = 23,8^\circ\text{C}$$

Onda se odredi, za date temperaturne uslove, pad pritiska vazduha pri prirodnom provetravanju, promaji, pomoću jednačine:

$$\Delta P_{pv} = 353 \cdot \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) H$$

gde su temperature vazduha u hladnom delu $T_c = 273,15 + 20 = 293,15\text{ K}$ a u toplom kraju, gde se izjednačuje sa srednjom logaritamskom temperaturom u sistemu, $T_h = 273,15 + 23,8 = 296,95\text{ K}$, pa je:

$$\Delta P_{pv} = 353 \cdot \left(\frac{1}{293,15} - \frac{1}{296,95} \right) \cdot 61 = 0,094\text{ mmH}_2\text{O}$$

Sada je moguće uporediti dobijene rezultate sa potrebnim i ostvarivim vrednostima pada pritiska pri prirodnom provetravanju, pa je uz prevođenje prethodne vrednosti za pad pritiska u Pa,

$$\Delta P = 0,094\text{ mmH}_2\text{O} \cdot 9,797 \frac{\text{Pa}}{\text{mmH}_2\text{O}} = 0,921\text{ Pa}$$

Vidi se da je mogući pad pritiska pri promaji veći od onog koji se javlja u biofiltru tj:

$$\text{Promaja (0,921 Pa)} > \text{Pad pritiska (0,0018 Pa)}$$

Komentar: Pri ovoj temperaturnoj razlici veća je promaja (prirodno provetravanje) nego što je potrebno, ali u periodima kad je T vode i vazduha slična na ovaj način se neće obezbediti dovoljno O_2 što može dovesti do pojave neprijatnih gasova,

kao što je H_2S . Treba uočiti da je pad pritiska za potreban protok vazduha jako mali i potrebno je više otvora za dovod vazduha kako bi se obezbedila ravnomerna distribucija, da ne bi došlo do pojave prostrujavanja kroz biofilter i neravnomernog kontakta vazduha sa svim ćelijama biomase na površini ispune.

Zadatak 2. Jednostepeni kapajući biofilter prečnika 10 m sadrži konvencionalno punjenje sa suprotnostrujnim tokom ukupne dubine 6,1 m. Primarno prečišćena struja otpadne vode uvodi se u filter, sa protokom od $4000 \text{ m}^3/\text{d}$, koncentracijom biodegradabilnog zagađenja od 120 mg/L (g/m^3), ukupnim suspendovanim česticama od 80 mg/L i ukupnim Kjedalovim azotom od 25 mg/L . Potrebno je odrediti ugljenično, BOD, i azotno kao ukupno, *TKN*, zapreminsko opterećenje, koliko je specifično azotno, *TKN*, opterećenje i kolika je prosečna efikasnost uklanjanja *BOD* na 20°C ? Na kraju je potrebno dati procenu može li se očekivati pojava procesa nitrifikacije u sistemu?

Rešenje:

- 1) Za definisani biofilter, potrebno je prvo odrediti zapreminu ispune, na osnovu poznatog prečnika, tj. površine poprečnog preseka i visine tornja biofiltra. Poprečni presek je sa površinom od:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{10^2 \cdot 3,14}{4} = 78,5 \text{ m}^2$$

a zapremina ispune je:

$$V = A \cdot H = 78,5 \text{ m}^2 \cdot 6,1 \text{ m} = 479 \text{ m}^3$$

Opterećenje je odnos masenog protoka zagađenja po danu u odnosu na zapreminu ispune biofiltra, pa je za *BOD*:

$$U_{BOD} = \frac{Q \cdot S_0}{V} = \frac{4000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 120 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}{479 \text{ m}^3} = 1 \frac{\text{kg BOD}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

A za TKN:

$$U_{TKN} = \frac{Q \cdot S_{TKN}}{V} = \frac{4000 \frac{m^3}{d} \cdot 25 \frac{g}{m^3} \cdot \frac{1 kg}{1000 g}}{479 m^3} = 0,21 \frac{kg TKN}{m^3 \cdot d}$$

- 2) Specifično opterećenje je odnos masenog protoka zagađenja po danu, u odnosu na ukupnu površinu ispune filtra. Iz tabele koja opisuje fizičke karakteristike ispune kapajućeg biofiltra, dobija se podatak, da je za konvencionalnu plastičnu ispunu specifična površina punjenja približno $90 m^2/m^3$.

Tabela 6.4 Fizičke karakteristike materijala ispune u kapajućim biofiltrima

Ispuna	Veličina cm	Približna gustina kg/m ³	Približna specifična površina m ² /m ³	Približna poroznost %	Primena uklanjanju
Rečni šljunak, sitan	2,5 – 7,5	1250 – 1450	60	50	Nitrifikacija
Rečni šljunak, krupan	10 – 13	800 – 1000	45	60	BOD, nitrifikacija, kombinovano BOD/nitrifik
Plastična, konvencionalna	61x61x122	30 – 80	90	> 95	BOD, nitrifikacija, kombinovano BOD/nitrifik
Plastična, sa velikom specifičnom površinom	61x61x122	65 – 95	140	> 94	Nitrifikacija
Plastična, sa nasumice pakovanjem	promenljiva	30 – 60	98	80	BOD, nitrifikacija, kombinovano BOD/nitrifik
Plastična, sa nasumice pakovanjem visoke specifične površine	promenljiva	50 – 80	150	70	Nitrifikacija

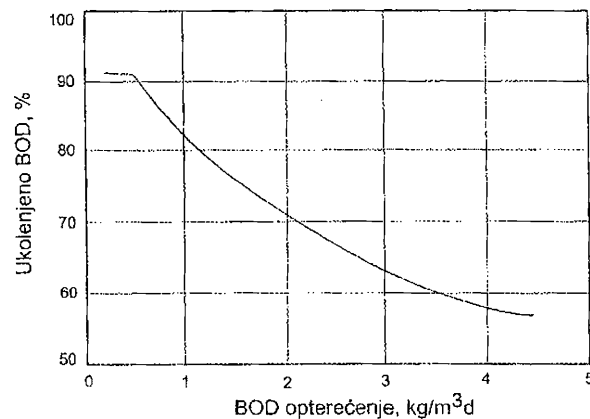
Odavde je ukupna površina inertnih nosača biofiltra jednaka:

$$A_p = V \cdot a_p = 479 m^3 \cdot 90 \frac{m^2}{m^3} = 43110 m^2$$

Sada je specifično opterećenje za *TKN*:

$$U_{STKN} = \frac{Q \cdot S_{TKN}}{A_p} = \frac{4000 \frac{m^3}{d} \cdot 25 \frac{g}{m^3} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}{43110 \text{ m}^2} = 2,3 \frac{g \text{ TKN}}{m^2 \cdot d}$$

- 3) Procenu približne efikasnosti uklanjanja *BOD* je moguće izvršiti sa grafika koji daje odnos opterećenja i efikasnosti uklanjanja *BOD* u biofiltrima, gde se može videti da sa opterećenjem od $1,0 \text{ kg BOD}/m^3 \cdot d$, efikasnost uklanjanja je oko 82%.



Slika: Efikasnost uklanjanja *BOD* u funkciji opterećenja biofiltra

- 4) Da li se pri ovim uslovima može pojaviti i proces nitrifikacije u biofiltru? Ne! Opterećenje *BOD* od $1,0 \text{ kg}/m^3 \cdot d$ je previsoko (u odnosu na opseg $0,1 - 0,3 \text{ kg BOD}/m^3 \cdot d$) da bi se pojavio proces kombinovanog uklanjanja *BOD* i *TKN*, iako je opterećenje *TKN* odgovarajuće za pojavu nitrifikacije, kao što je pokazano u donjoj tabeli.

Pri velikim *BOD* opterećenjima heterotrofne bakterije postaju dominantne u odnosu na nitrifikujuće na površini punjenja i na taj način kontrolišu populaciju biomase u sloju na površini inertnog nosača.

Tabela 6.5. Zavisnosti kvaliteta efluenta od opterećenja biofiltra

Primena postupka biofiltracije	Opterećenje biofiltra		Kvalitet efluenta	
	Jedinice	Opseg	Jedinice	Opseg
Sekundarni tretman	$kgBOD/m^3d$ (po zapremini ispune filtra)	0,3 – 1,0	$BOD\ mg/L$ $TSS\ mg/L$	15 – 30 15 – 30
Kombinovano uklanjanje BOD i nitrifikacija	$kgBOD/m^3d$ (po zapremini ispune filtra)	0,1 – 0,3	$BOD\ mg/L$	<10
	$gTKN/m^3d$ (po zapremini ispune filtra)	0,2 – 1,0	$NH_4\ mg/L$	<3
Tercijerna nitrifikacija	$gNH_4 - N/m^2d$ (po površini ispune filtra)	0,5 – 2,5	$NH_4\ mg/L$	0,5 – 3
Delimično uklanjanje BOD	$kgBOD/m^3d$ (po zapremini ispune filtra)	1,5 – 4,0	% uklonjenog BOD	40 – 70

Komentar: Uopšteno govoreći važno je primetiti da će postojati velike varijacije brzina nitrifikacije u zavisnosti od specifičnih uslova u samom biofiltru.

Zadatak 3. Komunalna otpadna voda sa koncentracijom bidegradabilnog organskog zagađenja od $200\ g/m^3$ se prečišćava u dvostepenom kapajućem biofiltru, odnosno filterima koji su redno povezani. Zahtevani kvalitet vode na izlazu je $25\ g\ BOD/m^3$. Ako je dubina oba filtra po $1,83\ m$, a recirkulacioni odnos 2:1, odrediti prečnike filtera do koji dolazi otpadna voda temperature $20\ ^\circ C$, sa protokom od $7570\ m^3/d$. Pretpostaviti da su efikasnosti oba filtra jednake, tj. da važi da je $E_1 = E_2$.

Rešenje:

- 1) Prvo je potrebno izračunati sa kolikom ukupnom efikasnošću rade oba biofiltra, a što se računa po ukupnom stepenu uklanjanja zagađenja:

$$E = \frac{(200 - 25) \frac{g \text{ BOD}}{m^3}}{200 \frac{g \text{ BOD}}{m^3}} \cdot 100 = 87,5 \%$$

Ukupna efikasnost je jednaka zbiru:

$$E = E_1 + E_2(1 - E_1) = 0,875$$

Pošto je $E_1 = E_2$ iz gornje jednačine se dobija da je:

$$E_1 = E_2 = 0,646$$

2) Da bi se došlo do zapremine prvog filtra, pored poznavanja efikasnosti biofiltra u prvom stepenu biofiltracije, neophodno je znati i recirkulacioni faktor, F , odnosno maseno opterećenje BOD koje dolazi na taj filter, W_1 , kako bi se iskoristila jednačina za efikasnost prvog biofiltra:

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0,4432 \sqrt{\frac{W_1}{VF}}}$$

Na osnovu ulaznog podatka da je vrednost recirkulacionog odnosa, $R = 2$, računa se koeficijent recirkulacije (recirkulacioni faktor), uz pomoć jednačine:

$$F = \frac{1 + R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2} = \frac{1 + 2}{\left(1 + \frac{2}{10}\right)^2} = 2,08$$

Maseno opterećenje prvog biofiltra se računa na osnovu ulaznih podataka:

$$\begin{aligned} W_1 &= BOD \cdot Q = 200 \frac{g}{m^3} \cdot 7570 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \\ &= 1514 \frac{\text{kg BOD}}{d} \end{aligned}$$

Sada je moguće poznate veličine ubaciti u jednačinu:

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0,4432 \sqrt{\frac{W_1}{VF}}} = \frac{100}{1 + 0,4432 \sqrt{\frac{1514}{V \cdot 2,08}}} = 64,6$$

Odakle se može izračunati zapremina:

$$V_1 = 476 \text{ m}^3$$

a na osnovu odnosa da je:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{V}{H} = \frac{476 \text{ m}^3}{1,83 \text{ m}} = 260 \text{ m}^2$$

Lako se izračunava da je:

$$D_1 = 18,2 \text{ m}$$

3) Sada se mora, na osnovu efikasnosti i masenog opterećenja prvog filtra, odrediti opterećenje u drugom biofiltru:

$$\begin{aligned} W_2 &= (1 - E_1)W_1 = (1 - 0,646) \cdot 1514 \frac{\text{kg BOD}}{\text{d}} \\ &= 536 \frac{\text{kg BOD}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Pošto je recirkulacioni faktor isti i u ovom slučaju, onda se primenom jednačine za efikasnost drugog biofiltra, na isti način, kao i kod prvog filtra, može izračunati njegova zapremina:

$$E_2 = \frac{100}{1 + \frac{0,4432}{1-E_1} \sqrt{\frac{W_2}{VF}}} = \frac{100}{1 + \frac{0,4432}{1-0,646} \sqrt{\frac{536}{V \cdot 2,08}}} = 64,6$$

Odakle se može izračunati zapremina:

$$V_2 = 1345 \text{ m}^3$$

Sada se na osnovu odnosa da je:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{V}{H} = \frac{1345 \text{ m}^3}{1,83 \text{ m}} = 735 \text{ m}^2$$

izračunava prečnik drugog biofiltra:

$$D_2 = 30,6 \text{ m}$$

4) Pošto su poznate obe zapremine biofiltera, moguće je odrediti njihovo zapreminsko opterećenje za svaki filter posebno.

Za prvi filter:

$$BOD_{opterećenje} = \frac{W_1}{V} = \frac{1514 \frac{kg}{d}}{476 m^3} = 3,18 \frac{kg}{m^3 \cdot d}$$

Za drugi filter:

$$BOD_{opterećenje} = \frac{W_2}{V} = \frac{536 \frac{kg}{d}}{1345 m^3} = 0,40 \frac{kg}{m^3 \cdot d}$$

5) Hidraulička opterećenja za oba filtra se računaju po jednačinama:

Prvi filter:

$$Hidrauličko \text{ opterećenje} = \frac{Q_{ukupno}}{A} = \frac{Q + 2Q}{A}$$

$$\begin{aligned} \text{Hidrauličko opterećenje} &= \frac{(1 + 2) \cdot 7570 \frac{m^3}{d}}{260 m^2 \cdot 1440 \frac{min}{d}} \\ &= 0,061 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} \end{aligned}$$

Drugi filter:

$$\begin{aligned} \text{Hidrauličko opterećenje} &= \frac{(1 + 2) \cdot 7570 \frac{m^3}{d}}{735 m^2 \cdot 1440 \frac{min}{d}} \\ &= 0,021 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} \end{aligned}$$

Komentar: Prečnici oba filtera moraju biti zaokružena na najbliže vrednosti celih metara, da bi se mogao prilagoditi standardni mehanizam rotacione distribucije. Da bi se smanjili troškovi gradnje filteri se obično prave istih dimenzija, ali se tada mora voditi računa da njihove efikasnosti tada ne mogu biti jednake.

Zadatak 4. Otpadna voda, nakon primarnog taloženja dolazi na biofilter. Protok otpadne vode, koja je na temperaturi od 14 °C, iznosi 15130 m³/d, sa sadržajem biodegradabilnog zagađenja, BOD, od 125 g/m³ i ukupnih suspendovanih materija, TSS, od 65 g/m³. Nakon sekundarne obrade, potrebno je obezbediti kvalitet efluenta sa 20 g/m³ BOD i 20 g/m³ TSS. Sekundarna obrada se vrši u biofilteru kroz dva tornja sa suprotnostrujnim tokom vode i vazduha, sa ukupnom dubinom ispune sa inertnim nosačima od 6,1 m, koja ima specifičnu površinu od 90 m²/m³, vrednost koeficijenta punjenja n = 0,5. Distribucija vode se obavlja pomoću raspodeljivača na vrhu filtra, sa dva kraka koji se rotiraju. Za obezbeđenje biološkog rasta na nosačima neophodno je obezbediti brzinu vlaženja od 0,5 L/m² · s. Za sekundarno taloženje se predviđa taložnik dubine 4,2m.

Na osnovu ulaznih podataka odrediti:

- 1) prečnik tornja kapajućeg biofiltera, m;
- 2) zapreminu traženog punjenja, m³;
- 3) potreban recirkulacioni odnos (ako postoji);
- 4) recirkulacioni protok, m³/h;
- 5) spirajuću i normalnu brzinu doziranja, mm/prolazu;
- 6) spirajuću i normalnu brzinu distributora vode, mm/obrtaju;
- 7) prečnik sekundarnog taložnika, ako je odnos maksimalnog i prosečnog protoka 1,5, m.

Rešenje:

- 1) Prečnik filtra se određuje na osnovu njegove površine, pri čemu se površina nalazi iz odnosa protoka otpadne vode, Q (L/s) i fluksa proticanja otpadne vode kroz filter, q (L/m² · s).

Fluks otpadne vode kroz biofilter se izračunava po jednačini:

$$q = \left[\frac{kH_{bf}}{\ln\left(\frac{S_0}{S}\right)} \right]^{1/n}$$

Da bi se izračunala vrednost brzine prečišćavanja otpadne vode (koji u sebe uključuje i karakteristike ispunje biofiltra), k , koristi se jednačina:

$$k_2 = k_1 \sqrt{\frac{H_{bf1}}{H_{bf2}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}$$

Kao koncentracija supstrata S_1 , uzima se vrednost od 150 g/m^3 , visine ispunje u oba tornja su jednake, a iz tabele se određuje vrednost za k_1 koja odgovara sanitarnoj otpadnoj vodi od 0,210:

Tabela 6.5 Vrednost koeficijenta k u funkciji od vrste otpadnih voda

Vrsta otpadne vode	$k_1, \frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$
Sanitarna	0,210
Prerada voća	0,181
Obrada metala	0,108
Mesna industrija	0,216
Farmaceutska	0,221
Prerada krompira	0,351
Rafinerija	0,059
Šećerane	0,165
Sintetičke boje	0,170
Prerada tekstila	0,107

pa je:

$$k_2 = 0,210 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot \sqrt{\frac{6,1 \text{ m}}{6,1 \text{ m}}} \cdot \sqrt{\frac{150 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{125 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}} = 0,230 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2}$$

Ovu vrednost je potrebno korigovati, shodno temperaturi predmetne otpadne vode u odnosu na standardne uslove od 20°C , pa je:

$$k_T = k_{20}(1,035)^{T-20} = k_{14} = 0,230 \frac{\left(\frac{L}{s}\right)^{0,5}}{m^2} \cdot (1,035)^{14-20}$$

$$= 0,187 \frac{\left(\frac{L}{s}\right)^{0,5}}{m^2}$$

Sada se zamenom vrednosti u prethodno navedenu jednačinu, dobija:

$$q = \left[\frac{kH_{bf}}{\ln\left(\frac{S_0}{S}\right)} \right]^{1/n} = \left[\frac{0,187 \frac{\left(\frac{L}{s}\right)^{0,5}}{m^2} \cdot 6,1 m}{\ln\left(\frac{125}{20}\right)} \right]^{1/0,5} = 0,3875 \frac{L}{m^2 \cdot s}$$

Površina tornja se računa na osnovu odnosa:

$$S = \frac{Q}{q} = \frac{15140 \frac{m^3}{d} \cdot 1000 \frac{L}{m^3} \cdot \frac{1 d}{86400 s}}{0,3875 \frac{L}{m^2 \cdot s}} = 452,2 m^2$$

Pošto je ovo ukupna površina oba tornja, onda je površina svakog pojedinačnog polovina od izračunate vrednosti tj.:

$$A_{bf} = \frac{A}{2} = \frac{452,2 m^2}{2} = 226,1 m^2$$

Odavde se lako izračunava prečnik tornja jednog biofiltra od:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{bf}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 226,1 m^2}{\pi}} = 17 m$$

2) Ukupna zapremina punjenja je jednaka proizvodu ukupne površine i visine ispune ili zbiru zapremina oba pojedinačna tornja, pa je:

$$V = H_{bf} \cdot A = 6,1 m \cdot 452,2 m^2 = 2758 m^3$$

3) Recirkulaciona brzina se računa iz poznate brzine vlaženja od $0,5 L/m^2 \cdot s$, koju čine zbir dolazećeg i recirkulacionog fluksa:

$$q + q_r = 0,5 \frac{L}{m^2 \cdot s}$$

odakle je vrednost q_r :

$$q_r = (0,5 - 0,39) \frac{L}{m^2 \cdot s} = 0,11 \frac{L}{m^2 \cdot s}$$

Sada je moguće izračunati recirkulacioni odnos:

$$R = \frac{q_r}{q} = \frac{0,11 \frac{L}{m^2 \cdot s}}{0,39 \frac{L}{m^2 \cdot s}} = 0,28$$

4) Recirkulacioni protok otpadne vode ka tornjevima, Q_p :

$$\begin{aligned} Q_p &= (q + q_r)A = (0,39 + 0,11) \frac{L}{m^2 \cdot s} \cdot 452,2 m^2 = 226 \frac{L}{s} \\ &= 814 \frac{m^3}{h} \end{aligned}$$

5) Radna brzina doziranja i spirajuća brzina doziranja se određuju na osnovu podataka datih u tabeli:

Tabela 6.6 Radne brzine distributora biofiltra

Organsko opterećenje kao BOD	Radni uslovi	Ispiranje u filtru
$kg/m^3 \cdot d$	$mm/prolazu$	$mm/prolazu$
0,25	10-30	≥ 200
0,50	15-45	≥ 200
1,00	30-90	≥ 300
2,00	40-120	≥ 400
3,00	60-180	≥ 600
4,00	80-240	≥ 800

$mm/prolazu$ - predstavlja količinu vode koja se dozira po vrhu filtra sa svakim prolazom kraka distributora

Da bi se koristili podaci dati u tabeli, potrebno je prvo odrediti organsko opterećenje, izraženo preko BOD:

$$\begin{aligned}
 BOD_{\text{opterećenje}} &= \frac{QS_0}{V} = \frac{15140 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 125 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}{2758 \text{ m}^3} \\
 &= 0,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}
 \end{aligned}$$

Ovoj vrednosti opterećenja odgovaraju vrednosti za spirajuću uslove od 300 mm/prolazu i radne uslove od 50 mm/prolazu!

Sada se primenjuje jednačina za određivanje brzine distributora, koji u ovom slučaju ima dva kraka, tj. $n_k = 2$, pa je za spiranje:

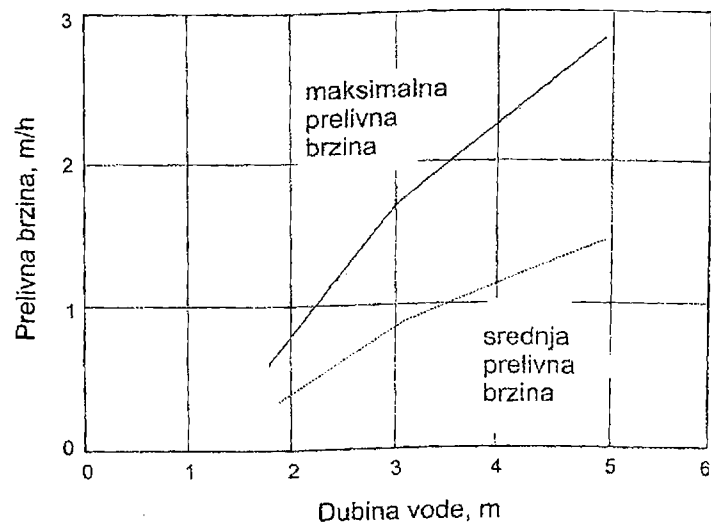
$$\begin{aligned}
 u_{\text{distributora}} &= \frac{(1 + R)q}{n_k \cdot u_{\text{dozera}}} \\
 &= \frac{(1 + 0,28) \cdot \frac{15140 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{452,2 \text{ m}^2 \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}}} \cdot 1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{2 \cdot 300 \frac{\text{mm}}{\text{protzu}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}} \\
 &= 0,050 \frac{\text{obrtaja}}{\text{min}}
 \end{aligned}$$

a za normalne radne uslove:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{distributora}} &= \frac{(1 + R)q}{n_k \cdot u_{\text{dozera}}} \\
 &= \frac{(1 + 0,28) \cdot \frac{15140 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{452,2 \text{ m}^2 \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}}} \cdot 1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{2 \cdot 50 \frac{\text{mm}}{\text{protzu}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}} \\
 &= 0,30 \frac{\text{obrtaja}}{\text{min}}
 \end{aligned}$$

Ovde je potrebno zapaziti da u slučaju kada imamo dve različite brzine okretanja distributera za normalnu i spirajuću brzinu doziranja, potrebno je da obezbedimo distributor sa varijabilnim brzinama raspršivanja.

6) Određivanje prečnika taložnika nakon biofiltra vrši se na osnovu preporučljivih prelivnih brzina maksimalnog i prosečnog protoka kroz taložnik. Sa dijagrama se uočava da su, za dubinu taložnika od 4,2m, te vrednosti 1,1 i 2,4 m/h.



Pošto je dato da je odnos maksimalnog i prosečnog protoka 1,5, onda će prosečna prelivna brzina biti ona vrednost koja utiče na dizajniranje taložnika.

$$\text{Protok} = 15140 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 630,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Površina dva taložnika} = 630,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,1 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 573,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Površina jednog taložnika} = \frac{573,5 \text{ m}^2}{2} = 286,7 \text{ m}^2$$

$$\text{Prečnik taložnika} = 14,1 \text{ m}$$

7) Ukupna konstrukcija sistema za biofiltraciju

Parametar	Jedinica	Vrednost
Broj filtera	-	2
Prečnik	<i>m</i>	17
Dubina	<i>m</i>	6,1
Ukupna zapremina punjenja	<i>m³</i>	2758
BOD opterećenje	<i>kg/m³ · d</i>	0,69
Hidraulička brzina doziranja	<i>L/m² · s</i>	0,39
Ukupna brzina doziranja	<i>m³/h</i>	814
Recirkulacioni odnos	-	0,28
Krakovi distributora	-	2
Normalna brzina distributora	<i>min/obrtaju</i>	3,33
Spirajuća brzina distributora	<i>min/obrtaju</i>	20
Taložnici	-	2
Dubina preciscivaca	<i>m</i>	4,2
Precnik	<i>m</i>	14,1

Zadatak 5. U biofiltru sa plastičnom ispunom, čija je specifična površina $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$, a ukupna visina nasutog sloja $6,1 \text{ m}$, vrši se uklanjanje ukupnog Kedralovog azota, sa efikasnošću od 90%. Otpadna voda dolazi do bifiltera sa protokom od 100 L/s , ima organsko zagađenje od 160 g/m^3 , koncentraciju Kedralovog azota od 25 g/m^3 i ukupne suspendovane čvrste materij 70 g/m^3 . Potrebno je odrediti zapreminu ispune tornja za biofiltraciju i uporediti izračunatu zapreminu sa predviđenom zapreminskom brzinom oksidacije. Takođe treba odrediti hidrauličku brzinu doziranja vode na vrh biofiltra.

Rešenje:

- 1) Prvo se izračunava specifična brzina uklanjanja *TKN*, po jednačini:

$$R_n = 0,82 \left(\frac{BOD}{TKN} \right)^{-0,44} = 0,82 \left(\frac{160}{25} \right)^{-0,44} = 0,36 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

- 2) Na osnovu protoka otpadne vode i stepena uklanjanja *TKN*, izračunava se ukupna količina uklonjenog *TKN*:

$$\begin{aligned} \text{Uklonjen TKN} &= Q(0,9 \cdot \text{TKN}) \\ &= 100 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} \cdot 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}} \cdot \left(0,9 \cdot 25 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right) \\ \text{Uklonjen TKN} &= 194400 \frac{\text{g}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Na osnovu ove veličine moguće je izračunati ukupnu potrebnu površinu punjenja u ispuni:

$$A_s = \frac{\text{Uklonjen TKN}}{R_n} = \frac{194400 \frac{\text{g}}{\text{d}}}{0,36 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} = 540000 \text{ m}^2$$

a na osnovu specifične površine punjenja se može odrediti zapremina punjenja:

$$V = \frac{540000 \text{ m}^2}{100 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}} = 5400 \text{ m}^3$$

- 3) Hidrauličko napajanje se definiše kao odnos protoka po površini poprečnog preseka tornja filtra, koja se određuje iz zapremine i dubine ispune:

$$A_{\text{biofiltra}} = \frac{V}{H_{\text{biofiltra}}} = \frac{5400 \text{ m}^3}{6,1 \text{ m}} = 885 \text{ m}^2$$

pa je:

$$q = \frac{Q}{A_{\text{biofiltra}}} = \frac{100 \frac{\text{L}}{\text{s}}}{885 \text{ m}^2} = 0,11 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Da bi se postigla minimalna vrednost hidrauličkog napajanja, neophodna je recirkulacija.

- 4) Organsko opterećenje se računa na osnovu koncentracije zagađenja na ulazu i izračunate zapremine ispune, odnosno površine poprečnog preseka tornja za biofiltraciju, pa je:

$$BOD_{zapreminsko} = \frac{8640 \frac{m^3}{d} \cdot 160 \frac{g}{m^3} \cdot \frac{1 kg}{1000 g}}{5400 m^2} = 0,26 \frac{kg}{m^3 \cdot d}$$

$$BOD_{površinsko} = 0,26 \frac{kg}{m^3 \cdot d} \cdot \frac{1}{100} \frac{m^2}{m^3} \cdot \frac{1000 g}{1 kg} = 2,6 \frac{kg}{m^2 \cdot d}$$

5) Zapreminska brzina oksidacije u bifiltru sa plastičnom ispunom se može izračunati pomoću jednačine:

$$\text{Zapreminska brzina oksidacije} = \frac{[S_0 + 4,6 \cdot (NO_x)]Q}{V}$$

Zapreminska brzina oksidacije

$$\begin{aligned} &= \frac{\left[160 \frac{g}{m^3} + 4,6 \cdot \left(0,9 \cdot 25 \frac{g}{m^3}\right)\right] \cdot 8640 \frac{m^3}{d}}{5400 m^3 \cdot \frac{1000 g}{1 kg}} \\ &= 0,42 \frac{kg}{m^3 \cdot d} \end{aligned}$$

Zadatak 6. Biofilar sa plastičnom ispunom dubine 8,0 m prečišćava komunalnu otpadnu vodu koja se sastoji od sanitarne i industrijske otpadne vode pogona za preradu hrane, koja radi u letnjem periodu godine. Otpadna voda ima sledeće karakteristike:

Srednji godišnji protok sanitarne otpadne vode, Q	5590 m^3/d
Protok industrijskih otpadnih voda	4160 m^3/d
Ukupan BOD_5 influenta sanitarnih voda	240 mg/L
Ukupan BOD_5 influenta sanitarnih plus ind. otp. voda	520 mg/L
Krajnji BOD_5 efluenta	$\leq 24 mg/L$
Vrednost k na 26 °C i na 6 m (podaci sa pilot postrojenja)	0,27 $(L/s)^{0,5}/m^2$
Temperatura (radna) letnja	20 °C
Temperatura (radna) zimska	10 °C

Potrebno je definisati osnovne gabarite tornja za biofiltraciju.

Rešenje:

- 1) Prvo se izračunava vrednost konstante k za vrednost na $20\text{ }^\circ\text{C}$ i dubinu filtra od 6 m

$$\begin{aligned}k_{20^\circ\text{C},6\text{m}} &= k_{26^\circ\text{C},6\text{m}} \theta^{T-26} = 0,27 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot 1,035^{20-26} \\ &= 0,22 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

- 2) Potom se izvrši korekcija vrednosti $k_{20^\circ\text{C}}$ sa vrednosti od 6 m , na vrednost za dubinu ispune od 8 m , korišćenjem sledeće jednačine:

$$\begin{aligned}k_{20^\circ\text{C},6\text{m}} &= k_{20^\circ\text{C},6\text{m}} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^x = 0,22 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot \left(\frac{6\text{ m}}{8\text{ m}}\right)^{0,5} \\ &= 0,19 \frac{\left(\frac{\text{L}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

- 3) Ukupan letnji protok otpadne vode je jednak zbiru sanitarne i industrijske:

$$\begin{aligned}Q &= (5590 + 4160) \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 9750 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1\text{ d}}{86400\text{ s}} \\ &= 112,8 \frac{\text{L}}{\text{s}}\end{aligned}$$

- 4) Da bi se odredila površina poprečnog preseka tornja za biofiltraciju visine ispune od 8 m , koristi se jednačina:

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{-\frac{k_{20^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}}{q^n}} = e^{-\frac{k_{20^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}}{\left(\frac{Q}{A_{\text{biofiltra}}}\right)^n}}$$

Na osnovu koje se može izraziti površina poprečnog preseka biofiltra A i zamenom se dobija:

$$\ln \frac{S_e}{S_i} = \frac{-k_{20^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}}{\left(\frac{Q}{A_{\text{biofiltra}}}\right)^n}$$

$$\begin{aligned}
 A_{\text{biofiltra}} &= Q \left[-\frac{\ln \frac{S_e}{S_i}}{k_{20^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}} \right]^{1/0,5} \\
 &= 112,8 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot \left[-\frac{\ln \frac{24 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{520 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}}{0,19 \frac{(\frac{\text{L}}{\text{s}})^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot 8\text{m}} \right]^{1/0,5} = 462 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

5) Da bi se odredila površina tornja od 8 m dubine ispune, kada je temperatura vode 10 °C, a koji bi zadovoljio traženi kvalitet efluenta, procedura se ponavlja, samo se računa sa novom temperaturom od 10 °C.

Izračuna se $k_{10^\circ\text{C}}$ za 6 m dubok filter:

$$\begin{aligned}
 k_{20^\circ\text{C},6\text{m}} &= k_{26^\circ\text{C},6\text{m}} \theta^{T-26} = 0,27 \frac{(\frac{\text{L}}{\text{s}})^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot 1,035^{10-26} \\
 &= 0,156 \frac{(\frac{\text{L}}{\text{s}})^{0,5}}{\text{m}^2}
 \end{aligned}$$

Koriguje se $k_{10^\circ\text{C}}$ vrednost za dubinu filtra od 8 m:

$$\begin{aligned}
 k_{10^\circ\text{C},8\text{m}} &= k_{10^\circ\text{C},6\text{m}} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^x = 0,156 \frac{(\frac{\text{L}}{\text{s}})^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot \left(\frac{6 \text{ m}}{8 \text{ m}} \right)^{0,5} \\
 &= 0,135 \frac{(\frac{\text{L}}{\text{s}})^{0,5}}{\text{m}^2}
 \end{aligned}$$

I izračunava se potrebna površina poprečnog presjeka tornja. Ovde se mora voditi računa da u zimskim uslovima nema industrijske otpadne vode, koja se javlja samo u letnjoj sezoni, kao i da se u primenjenoj jednačini vrednost koeficijenta izražava u jedinicama L/s, zbog konzistentnosti sa ostalim jedinicama. Tako se dobija da je iz jednačine:

$$\ln \frac{S_e}{S_i} = \frac{-k_{10^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}}{\left(\frac{Q}{A_{\text{biofiltra}}} \right)^n}$$

$$A_{\text{biofiltra}} = Q \left[- \frac{\ln \frac{S_e}{S_i}}{k_{20^\circ\text{C}} H_{\text{biofiltra}}} \right]^{1/0,5}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{biofiltra}} &= \\ &= 5590 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} \\ &\quad \cdot \left[- \frac{\ln \frac{24 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{520 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}}{0,135 \frac{(\text{L})^{0,5}}{\text{m}^2} \cdot 8 \text{ m}} \right]^{1/0,5} = 294 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

6) Izbor potrebne površine poprečnog preseka tornja se vrši na osnovu uslova da se u oba slučaja mora zadovoljiti traženi kvalitet efluenta, pa je očito da će dimenzije uređaja kontrolisati parametri u letnjim uslovima, pa je stoga potrebna projektovana površina tornja 462 m^2 .

7) Za dati poprečni presek, hidrauličko opterećenje je:

Za letnje uslove:

$$\text{Hidrauličko opterećenje} = \frac{9750 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{462 \text{ m}^2} = 21,1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Za zimske uslove:

$$\text{Hidrauličko opterećenje} = \frac{5590 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{462 \text{ m}^2} = 12,1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

8) Organska opterećenja, *BOD*, za ovakav biofilter se određuju na bazi zapremine ispune, koja u ovom slučaju iznosi:

$$V = H_{\text{biofiltra}} \cdot A_{\text{biofiltra}} = 8 \text{ m} \cdot 462 \text{ m}^2 = 3696 \text{ m}^3$$

Sada je organsko opterećenje:

Za leto:

$$\text{BOD}_{\text{opterećenje}} = \frac{9750 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 520 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{3696 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 1,37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Za zimu:

$$BOD_{opterećenje} = \frac{5590 \frac{m^3}{d} \cdot 240 \frac{g}{m^3}}{3696 m^3 \cdot 1000 \frac{g}{kg}} = 0,36 \frac{kg}{m^3 \cdot d}$$

- 9) Brzina okretanja rotirajućeg distributera, određuje se posredno na osnovu brzine doziranja, $cm/prolazu$ kraka dozatora, koja se može približno odrediti množenjem BOD opterećenja u $kg/m^3 \cdot d$ sa 0,30.

Za leto, brzina doziranja je:

$$Brzina\ doziranja = 1,37 \cdot 0,3 = 0,41 \frac{cm}{prolazu}$$

Kada se koristi distributor sa dve ruke, tj. kada je $a = 2$, onda se dobija potreban broj obrtaja distributera po jednačini:

$$n = \frac{0,00044 \cdot q_t}{a \cdot brzina\ doziranja} = \frac{0,00044 \cdot 21,1}{2 \cdot 0,41} \\ = 0,0113 \frac{obrtaja}{min}$$

ili 1 revolucija (obrt) svakih 85,5 min.

Za zimu je:

$$Brzina\ doziranja = 0,36 \cdot 0,3 = 0,108 \frac{cm}{prolazu}$$

A hidrauličko opterećenje je $12,1 m^3/m^2 \cdot d$, pa je traženi broj obrtaja:

$$n = \frac{0,00044 \cdot 12,1}{2 \cdot 0,108} = 0,025 \frac{obrtaja}{min}$$

ili jedan obrt (revolucija) svakih 40 min.

Zadatak 7. Otpadna voda sadrži u sebi $140 g/m^3$ organskog zagađenja, od čega je $90 g/m^3$ rastvorljivo i $70 g/m^3$ ukupnih suspendovanih materija. Protok otpadne vode je $4000 m^3/da$ propisani uslovi za efluent su $20 g/m^3$, BOD , $10 g/m^3 sBOD$ i $20 g/m^3 TSS$. Ovu otpadnu

vodu je potrebno prečistiti na redno povezanom nizu biodiskova, pa u skladu sa ulaznim parametrima potrebno je proračunati osnovne veličine ovog sistema.

Rešenje:

- 1) Svaka grupa biodiskova, koja bi se projektovala za ovakav sistem, mora imati odgovarajući broj osovina na kojima se nalaze poredjani biodiskovi, sa odgovarajućom površinom.

Broj vratila za prvu fazu:

Usvojice se na početku vrednost rastvorenog organskog opterećenja po površini biodiskova i danu od $15 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$

Ukupno maseno opterećenje rastvorenim *BOD* je jednako proizvodu koncentracije i protoka pa je:

$$\begin{aligned} \text{Ukupno } BOD_{\text{opterećenje}} &= sBOD \cdot Q = 90 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 4000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \\ &= 360000 \frac{\text{g}}{\text{d}} \end{aligned}$$

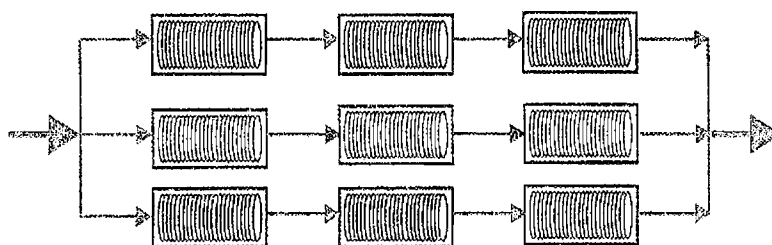
Iz ukupnog i opterećenja po površini biodiska, dobija se ukupno potrebna površina:

$$A_{bd} = \frac{360000 \frac{\text{g}}{\text{d}}}{15 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} = 24000 \text{ m}^2$$

Po jednom vratilu moguće je obezbediti dodirnu površinu od 9300 m^2 , odakle je jasno da je u prvoj fazi potrebno 3 vratila (pošto je inače broj vratila jednak odnosu $24000 \text{ m}^2 / (9300 \text{ m}^2 / \text{vratilu})$ što daje broj od 2,6, a broj vratila mora biti prvi veći ceo broj)

- 2) Pošto je definisan broj vratila u jednoj grupi biodiskova, potrebno je pretpostaviti broj grupa koje će biti redno povezane i proveriti da li taj broj biodiskova može da prečisti vodu do željenog nivoa.

U ovom slučaju, može se poći od pretpostavke da se ugrađuju 3 grupe redno povezanih biodiskova, od kojih svaka ima po tri vratila, što je šematski pokazano na slici:



Pošto u jednoj liniji postoje 3 vratila, onda je po svakoj liniji protok otpadne vode jednak trećini ukupnog protoka, pa iznosi $(4000 \text{ m}^3/d)/3 = 1333,3 \text{ m}^3/d$.

3) Sada je potrebno za svaku od ovih grupa proračunati kako se menja koncentracija rastvorenog organskog zagađenja po izlasku iz odgovarajuće grupe biodiskova. Izlazna koncentracija iz prethodne je ulazna koncentracija za sledeću grupu biodiskova i to se ponavlja za svaku sledeću. Takođe, potrebno je voditi računa da se usled postojanja tri paralelna vratila sa biodiskovima u okviru svake grupe i protok deli na odgovarajući broj osovina.

Za izračunavanje promene koncentracije po grupama biodiskova koristi se jednačina:

$$S_n = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,00974 \cdot \frac{A_s}{Q} \cdot S_{n-1}}}{2 \cdot 0,00974 \cdot \frac{A_s}{Q}}$$

Za rešenje ove jednačine potrebno je znati odnos A_s/Q , koji je u ovom slučaju jednak za sve tri grupe, pošto je isti broj vratila u svim grupama, pa je:

$$\frac{A_s}{Q} = \frac{9300 \text{ m}^2}{1333,3 \frac{\text{m}^3}{d}} = 6,97 \frac{d}{\text{m}}$$

Sada je za prvu grupu biodiskova:

$$S_1 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,00974 \cdot 6,97 \cdot 90}}{2 \cdot 0,00974 \cdot 6,97} = 29,8 \frac{g}{m^3}$$

Za drugu grupu je ulazna koncentracija rastvorenog organskog zagađenja jednaka $29,8 \text{ g/m}^3$, pa je:

$$S_2 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,00974 \cdot 6,97 \cdot 29,8}}{2 \cdot 0,00974 \cdot 6,97} = 14,8 \frac{g}{m^3}$$

a za treću grupu biodiskova je:

$$S_3 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,00974 \cdot 6,97 \cdot 14,8}}{2 \cdot 0,00974 \cdot 6,97} = 9,1 \frac{g}{m^3}$$

Pošto je cilj bio da na izlazu iz postrojenja bude 10 g/m^3 za S_3 , predložena konstrukcija je zadovoljavajuća.

4) Organsko i hidrauličko opterećenje u ovom slučaju se računaju za svaku grupu posebno ili za sistem u celini.

Organsko opterećenje prve grupe biodiskova:

$$BOD_{opterećenje} = \frac{Q \cdot sBOD}{n \cdot A_{bd}} = \frac{4000 \frac{m^3}{d} \cdot 90 \frac{g}{m^3}}{3 \cdot 9300 m^2} = 12,9 \frac{g}{m^2 \cdot d}$$

Prelivno organsko opterećenje:

$$\begin{aligned} \text{Prelivno } BOD_{opterećenje} &= \frac{Q \cdot BOD}{n \cdot n_v \cdot A_{bd}} = \frac{4000 \frac{m^3}{d} \cdot 140 \frac{g}{m^3}}{3 \cdot 3 \cdot 9300 m^2} \\ &= 6,7 \frac{g}{m^2 \cdot d} \end{aligned}$$

Hidrauličko opterećenje:

$$\begin{aligned} \text{Hidrauličko opterećenje} &= \frac{Q}{n \cdot n_v \cdot A_{bd}} = \frac{4000 \frac{m^3}{d}}{3 \cdot 3 \cdot 9300 m^2} \\ &= 0,05 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} \end{aligned}$$

Komentar: Pri nižim $sBOD$ koncentracijama moguća je i nitrifikacija na biodiskovima u grupama 2 i 3.

Anaerobna obrada

Zadatak 1. Odrediti dimenzije reaktora, brzinu formiranja gasa, raspoloživu energiju, brzinu rastvaranja, potrebnu alkalnost i nutritijente za anaerobni kontakt proces da bi se dostiglo uklanjanje *COD* od 90 %.

Karakteristike otpadne vode:

	Jedinica	Vrednost
Protok	m^3/d	300
<i>COD</i>	g/m^3	6000
<i>sCOD</i>	g/m^3	4000
<i>COD/TSS</i>	g/g	1,8
Biorazgradivi TSS	%	80
Azot	g/m^3	10
Fosfor	g/m^3	20
Alkalitet	$g CaCO_3/m^3$	500
Temperatura	$^{\circ}C$	25

Dati parametri i pretpostavke:

1. Koncentracija *TSS* u efluentu, $TSS_e = 150 g/m^3$
2. Za projektovano vreme zadržavanja ćelija, faktor sigurnosti je 1,5
3. $VSS/TSS = 0,85$
4. $f_d = 0,15 g/g$
5. Koristiti kinetičke parametre iz date tabele
6. Potrebni nutritijenti za biomasu su $N = 12\%$ i $P = 2,4\%$
7. Za vrednost $\theta > 40$ dana može se smatrati da je biorazgradiv *TSS* uklonjen
8. $MLSS = 6000 g/m^3$
9. Brzina taloženja = $24 m/d$
10. Gas se sastoji od 65% CH_4 i 35% CO_2

Tabela 6.7. Sumirana tabela projektnih parametara za anaerobni proces sa kompletnim mešanjem i suspendovanim rastom za uklanjanje rastvorenog COD

Parametar		Jedinica	Opseg vrednosti	Tipična vrednost
Y	Fermentacija	g/g	0,06-0,12	0,10
	Metanogeneza		0,02-0,06	0,04
	Ukupni		0,05-0,10	0,08
k _d	Fermentacija	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,02-0,06	0,04
	Metanogeneza	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,01-0,04	0,02
	Ukupni	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,02-0,04	0,03
μ _m	35 °C	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,30-0,38	0,35
	30 °C	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,22-0,28	0,25
	25 °C	$\frac{g}{g \cdot d}$	0,18-0,24	0,20
K _s	35 °C	$\frac{mg}{L}$	60-200	160
	30 °C	$\frac{mg}{L}$	300-500	360
	25 °C	$\frac{mg}{L}$	800-1100	900
Metan	Produkcija na 35°C	$\frac{m^3}{kg COD}$	0,4	0,4
	Gustina na 35°C	$\frac{kg}{m^3}$	0,6346	0,6346
	Sadržaj gasa	%	60-70	65
	Energetski sadržaj	$\frac{kJ}{g}$	50,1	50,1

Rešenje:

1) Određivanje vremena zadržavanja ćelija na 25°C.

Pri uklanjanju COD od 90%, njegova vrednost u efluentu iznosi:

$$COD_e = (1,0 - 0,90) \cdot 6000 \frac{g}{m^3} = 600 \frac{g}{m^3}$$

Na osnovu koncentracije TSS u efluentu izračunava se i zastupljenost COD u njemu:

$$COD \text{ u efluentu iz TSS} = 150 \frac{mg}{L} \cdot 1,8 \frac{g COD}{g TSS} = 270 \frac{g}{m^3}$$

Dozvoljena vrednost rastvorenog COD u efluentu iznosi:

$$sCOD_e = 600 - 270 = 330 \frac{g}{m^3}$$

Za određivanje vremena zadržavanja koristiće se preuređena jednačina:

$$\theta = \left(\frac{\mu_m S_e}{K_s + S_e} - k_d \right)^{-1}$$

Vrednosti iz date tabele:

$$\mu_m = 0,20 \frac{g}{g \cdot d}$$

$$K_s = 900 \frac{mg}{L}$$

$$k_d = 0,03 \frac{g}{g \cdot d}$$

Zamenom vrednosti dobija se:

$$\theta = \left[\frac{0,20 \frac{g}{g \cdot d} \cdot 330 \frac{g}{m^3}}{(900 + 330) \frac{g}{m^3}} - 330 \frac{g}{g \cdot d} \right]^{-1} = 42,3 d$$

Uzimanjem u obzir faktora sigurnosti, vreme zadržavanja ćelija iznosi:

$$\theta = 1,5 \cdot 42,3 = 63,4 d \approx 63 d$$

2) Određivanje produkcije mulja.

Izračunavanje bionerazgradivog dela *TSS*.

Kada je $\theta > 40$ dana biorazgradivi deo *TSS* je transformisan:

$$pCOD = 6000 - 4000 = 2000 \frac{g}{m^3}$$

Određivanje *pCOD* kao *TSS* korišćenjem $1,8 g COD/g TSS$:

$$pCOD \text{ kao } TSS = \frac{2000 \frac{g COD}{m^3}}{1,8 \frac{g COD}{g TSS}} = 1111 \frac{g TSS}{m^3}$$

Biorazgradiva frakcija TSS čini 0,8, a ostali deo TSS od 0,2 čini bionerazgradivi deo:

$$\text{Bionerazgradiv TSS} = 0,20 \cdot 1111 = 222 \frac{\text{g TSS}}{\text{m}^3}$$

Bionerazgradivi deo suspendovanih materija zapravo predstavlja bionerazgradive organske čestice i inertne čestice koje dolaze sa influentom:

$$\text{Bionerazgradivi TSS} = X_{o,i} + iTSS$$

Produkcija ukupnog mulja se dobija primenom jednačine:

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta} \cdot \frac{1}{0,85} + Q X_{o,i} + Q iTSS$$

$$\begin{aligned} S_0 - S &= \text{uklonjen COD} \\ &= \text{COD u influentu} - \text{bionerazgradivi TSS COD} \\ &\quad - \text{bionerazgradivi rastvoreni COD u efluentu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_0 - S &= 6000 \frac{\text{g COD}}{\text{m}^3} - \left(\frac{222 \frac{\text{g TSS}}{\text{m}^3}}{1,8 \frac{\text{g COD}}{\text{g TSS}}} \right) - 330 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ &= 5270 \frac{\text{g COD}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Iz date tabele:

$$Y = 0,08 \frac{\text{g}}{\text{g}}$$

$$k_d = 0,03 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{d}}$$

Zamenom vrednosti u jednačinu dobija se da je vrednost produkcije mulja:

$$\begin{aligned}
P_{X,TSS} &= \frac{300 \frac{m^3}{d} \cdot 0,08 \frac{g}{g} \cdot 5270 \frac{g}{m^3} \cdot 1}{1 + 0,03 \frac{g}{g \cdot d} \cdot 63 d} \cdot 0,85 \\
&+ \frac{0,15 \frac{g}{g} \cdot 0,03 \frac{g}{g \cdot d} \cdot 300 \frac{m^3}{d} \cdot 0,08 \frac{g}{g} \cdot 5270 \frac{g}{m^3} \cdot 63 d}{1 + 0,03 \frac{g}{g \cdot d} \cdot 63 d} \cdot 0,85 \\
&+ 300 \frac{m^3}{d} \cdot 222 \frac{g}{m^3} \\
P_{X,TSS} &= 132685 \frac{g}{d}
\end{aligned}$$

3) Određivanje zapremine reaktora i hidrauličkog vremena zadržavanja, τ .

$$V = \frac{P_{X,TSS} \cdot \theta}{X_{MLSS}}$$

Vrednost $MLSS$ je data, pa zamenom svih vrednosti u prethodnu jednačinu dobija se:

$$V = \frac{132685 \frac{g}{d} \cdot 63 d}{6000 \frac{g}{m^3}} = 1393 m^3$$

A hidrauličko vreme zadržavanja je:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{1393 m^3}{300 \frac{m^3}{d}} = 4,64 d$$

4) Određivanje produkcije metana i ukupnog gasa i energetskeg zadržaja.

Produkcija metana

Iz tabele:

$$\text{Zapremina metana na } 35^\circ\text{C} = 0,4 \frac{m^3 CH_4}{kg COD}$$

Dobija se:

$$\begin{aligned} \text{Zapremina metana na } 25^{\circ}\text{C} &= 0,4 \cdot \frac{273,15 + 25}{273,15 + 25} \\ &= 0,39 \frac{\text{m}^3}{\text{kg COD}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ukupna produkcija } \text{CH}_4 & \\ &= 0,39 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 5270 \frac{\text{g COD}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \cdot 300 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \\ &= 616,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \end{aligned}$$

Pa ukupna produkcija gasa tada iznosi:

$$\text{Produkcija gasa} = \frac{616,6 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{d}}}{0,65 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{m}^3 \text{ gasa}}} = 948,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Energetski sadržaj u gasu

Na 25°C , energetski sadržaj u jednom molu gasa iznosi:

$$V = \frac{1 \text{ mol} \cdot 0,082057 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot (273,15 + 25) \text{K}}{1,0 \text{ atm}} = 24,5 \text{ L}$$

Ukupno proizvedeni molovi metana u toku dana:

$$\frac{\text{mol CH}_4}{\text{d}} = \frac{616,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{24,5 \frac{\text{L}}{\text{mol}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{L}}} = 25167 \frac{\text{mol}}{\text{d}}$$

$$\text{Masa metana} = 25167 \frac{\text{mol CH}_4}{\text{d}} \cdot 16 \frac{\text{g CH}_4}{\text{mol}} = 4,03 \cdot 10^5 \frac{\text{g}}{\text{d}}$$

$$\text{Energetski sadržaj} = 4,03 \cdot 10^5 \frac{\text{g}}{\text{d}} \cdot 50,1 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} = 20,2 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{d}}$$

5) Određivanje potrebe za nutrijentima.

Produkcija biomase:

$$P_{x,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)\theta}{1 + (k_d)\theta}$$

$$P_{x,bio} = 51488 \frac{g}{d} + 14597 \frac{g}{d}$$

$$P_{x,bio} = 66085 \frac{g}{d}$$

Za potrebe biomase, $N = 12\%$ i $P = 2,4\%$, zahtevane količine nutrijenata su:

$$Potrebno N = 66085 \frac{g}{d} \cdot 0,12 \frac{g}{g} \cdot 0,85 = 6741 \frac{g}{d}$$

$$Potrebno P = 66085 \frac{g}{d} \cdot 0,024 \frac{g}{g} \cdot 0,85 = 1348 \frac{g}{d}$$

Količina nutrijenata u influentu:

$$N = 10 \frac{g}{m^3} \cdot 300 \frac{m^3}{d} = 3000 \frac{g}{d}$$

$$P = 20 \frac{g}{m^3} \cdot 300 \frac{m^3}{d} = 6000 \frac{g}{d}$$

Na osnovu izračunatih vrednosti može se uočiti da voda sadrži dovoljnu količinu fosfora ali ne i dovoljnu količinu azota, pa je nedostatak potrebno dodati.

$$Dodati N = (6741 - 3000) \frac{g}{d} = 3741 \frac{g}{d} = 3,74 \frac{kg}{d}$$

6) Određivanje potrebnog alkaliteta.

Tabela za izračunavanje minimalnog alkaliteta kao $CaCO_3$, da bi se održala pH na 7,0 kao funkcija temperature i procenta ugljen dioksida tokom anaerobne digestije.

Tabela 6.8 Vrednost potrebnog alkaliteta pri uvođenju ugljen-dioksida u vodu

Temperatura, °C	Gasna faza CO_2 , %			
	25	30	35	40
20	900	1050	1200	1400
25	1100	1300	1500	1700
30	1300	1600	1800	2100
35	1500	1800	2100	2400
40	1700	2100	2400	2800

Iz tabele, minimalna potreba za alkalitetom pri 35% CO_2 je $1500 \frac{mg}{L}$ kao $CaCO_3$

$$Kao NaHCO_3 = \frac{84 \frac{g NaHCO_3}{eq} \cdot 10^3 \frac{g}{m^3}}{50 \frac{g}{eq CaCO_3}} = 1680 \frac{g NaHCO_3}{m^3}$$

$$\frac{NaHCO_3}{d} = 1680 \frac{g}{m^3} \cdot 300 \frac{m^3}{d} \cdot 10^{-3} \frac{kg}{g} = 504 \frac{kg}{d}$$

7) Određivanje prečnika sekundarnog taložnika.

$$Površina = \frac{Q}{brzina\ taloženja} = \frac{300 \frac{m^3}{d}}{24 \frac{m}{d}} = 12,5 m^2$$

Pa se dobija da je prečnik:

$$D = 4 m$$

Dezinfekcija

Zadatak 1. Nakon sekundarne obrade u biofiltru, efluent sa srednjim protokom od $11360 \text{ m}^3/\text{d}$ se dezinfikuje hlorom. Potrebno je proračunati mesečne potrebe za tečnim hlorom koji služi za dezinfekciju ove otpadne vode.

Rešenje:

- 1) Ukupno potrebna doza se dobija iz koncentracije i protoka otpadne vode, a na osnovu preporučene koncentracije hlora za određeni efluent. Za efluent koji dolazi nakon biofiltracije, preporučena vrednost koncentracije hlora je 10 mg/L .

Tabela 6.9 Preporučene doze hlora za dezinfekciju efluenta

Tip tretmana i efluenta	Preporučena doza hlora <i>mg/L</i>
Efluent iz primarnog taložnika	20
Efluent iz lagune (nefiltriran)	20
Efluent iz lagune (filtriran)	10
Efluent iz kapajućeg biofiltra	10
Efluent iz aktivnog mulja	6 – 8
Efluent iz aktivnog mulja sa dodatkom hemijskog tretmana	4
Efluent nakon nitrifikacije	6
Efluent nakon biodiska (filtriran)	4 – 6

Na taj način je dnevna potrošnja hlora:

$$M_{\text{Cl}_2} = 11360 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 113,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Pošto se hlor pakuje u kontejnerima od 1 T, to je na osnovu mesečne potrošnje hlora:

$$(M_{Cl_2})_{mesecc} = 113,6 \frac{kg}{d} \cdot 30 \frac{dana}{mesecc} = 3408 \frac{kg}{mesecc}$$

To je potrebno obezbediti 4 jednotonska kontejnera za rastvor hlora, na mesečnom nivou.

Zadatak 2. U postrojenju za obradu otpadnih voda, sa srednjim protokom od $28400 \text{ m}^3/d$, neophodno je na izlazu dozirati hlor u količini od 8 mg/L . Hlorisanje se vrši dodatkom 10% rastvora $NaOCl$. Vreme potrebno za isporuku od trgovačke kuće do postrojenja je 2 dana. Potrebno je obezbediti minimalno 10-to dnevnu rezervu hipohlorita. Odrediti potreban kapacitet skladišnog tanka za skladištenje rastvora $NaOCl$, sa 0,03% dnevnom brzinom razlaganja.

Rešenje:

1) Dnevna potreba za hlorom je:

$$M_{Cl_2} = \frac{28400 \frac{m^3}{d} \cdot 8 \frac{g}{m^3}}{1000 \frac{g}{kg}} = 227,2 \frac{kg}{d}$$

2) Na osnovu koncentracije hipohlorita, potrebna doza hipohlorita je:

$$10\% \text{ rastvor} = 100 \frac{g}{L} = 100 \frac{kg}{m^3}$$

$$V = \frac{227,2 \frac{kg}{d}}{100 \frac{kg}{m^3}} = 2,27 \frac{m^3}{d}$$

3) Zapremina skladišnog kontejnera koja mora da obezbedi količinu za 2 dana transporta i 10 dana korišćenja $NaOCl$, se izračunava po jednačini:

$$V_{tanka} = 2,27 \frac{m^3}{d} \cdot (2d + 10d) = 27,24 \text{ m}^3$$

4) Pošto sa vremenom dolazi do razlaganja hipohlorita i smanjenja njegove aktivne komponente, neophodno je u proračunu rezervi ukaikulisati i ovu pojavu, pa je potrebna zapremina tanka:

$$\text{Korekcionni faktor} = \frac{0,03\%}{d} \cdot 12 d = 0,36\%$$

$$V_{kor.tanka} = \frac{27,24 \text{ m}^3 \cdot 10\%}{10\% - 0,36\%} = 28,3 \text{ m}^3$$

Zadatak 3. Izračunati potrebnu koncentraciju rezidualnog hlora koju je neophodno održavati u efluentu, da bi se ostvarila gustina fekalnih koliformnih bakterija, (*FC*), od 200 *FC/100 mL*. Neposredno pre hlorisanja efluent sadrži $4 \cdot 10^6$ *FC/100 mL*. Vreme hlorisanja je 30 *min*.

Rešenje:

1) Rezidualna koncentracija hlora se računa po jednačini:

$$\frac{N_t}{N_0} = (1 + 0,23 C_R t)^{-3}$$

gde je C_R rezidualni hlorni jon u vremenu t u *mg/L*.

Zamenom vrednosti u gornjoj jednačini, može se odrediti proizvod $C_R t$ pa je:

$$\frac{200}{(4 \cdot 10^6)} = (1 + 0,23 C_R t)^{-3}$$

$$5 \cdot 10^{-5} = (1 + 0,23 C_R t)^{-3}$$

$$1 + 0,23 C_R t = (0,2 \cdot 10^5)^{1/3} = 27,14$$

$$C_R t = 113,7$$

Oдавде se za vreme hlorisanja od $t = 30$ *min*, dobija tražena vrednost koncentracije rezidualnog hlora od:

$$C_R = \frac{113,7}{30} = 3,8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

2) Ukoliko se u sistemu javlja i udarni protok, koji može biti i višestruko veći od srednjeg protoka, onda je potrebna koncentracija rezidualnog hlora proporcionalna izračunatoj koncentraciji za srednji protok i odnosa između udarnog i srednjeg protoka, n . Tako, u slučaju da je odnos udarnog i

srednjeg protoka jednak 3, potrebna koncentracija rezidualnog hlora bi bila:

$$C_R = 3,8 \frac{mg}{L} \cdot 3 = 11,4 \frac{mg}{L}$$

Zadatak 4. U postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda prosečan protok efluenta je $0,131 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je udarni $0,329 \text{ m}^3/\text{s}$. Izračunati zapreminu suda za hlorni rastvor potrebnu za hlorisanje efluenta, ako se usvoji da je kontaktno vreme (vode i hlornog rastvora) pri udarnom protoku 20 min .

Rešenje:

1) Potrebna zapremina reaktora za dezinfekciju je:

$$V_{rd} = 0,329 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 20 \text{ min} = 395 \text{ m}^3$$

2) Pri prosečnom protoku potrebna zapremina je:

$$V_{rd} = 0,131 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 30 \text{ min} = 236 \text{ m}^3$$

Poređenjem ove dve vrednosti vidi se da je udarni protok određujući faktor koji utiče na zapreminu reaktora za dezinfekciju.

3) Sa ovako definisanom zapreminom, potrebno je odrediti dimenzije reaktorskog prostora za dezinfekciju. Da bi do dezinfekcije došlo potrebno je određeno vreme kontakta, koje se obezbeđuje dovoljnom dužinom bazena, pa se u tu svrhu najčešće prave bazeni sa pregradama i višestrukim šikanama, kako bi se obezbedio taj dovoljno dug put za kontakt.

U ovom slučaju, može se konstruisati jedan bazen sa tri prolaza oko krajeva odbojnika, kod kojih je širina toka $W = 2,2 \text{ m}$, sa dubinom vodenog sloja $H = 1,8 \text{ m}$ i slobodnom stranicom iznad nivoa vode od $0,6 \text{ m}$.

Na taj način je:

$$\frac{H}{W} = \frac{1,8 \text{ m}}{2,2 \text{ m}} = 0,82$$

Preporučeni odnos je manji od 1, pa je time ovaj uslov zadovoljen. Poprečni presek toka vode je proizvod dubine i širine toka, pa je:

$$A_d = 1,8 \text{ m} \cdot 2,2 \text{ m} = 3,96 \text{ m}^2$$

Iz potrebne zapremine i poprečnog preseka, moguće je odrediti ukupnu dužinu reaktorskog prostora za dezinfekciju, pa je:

$$L = \frac{395 \text{ m}^3}{3,96 \text{ m}^2} = 99,7 \text{ m} \approx 100 \text{ m}$$

Preporučeni odnos dužine i širine dezinfekcionog bazena je između $L/W = 40 - 70$, tako da se u ovom slučaju taj zahtev zadovoljava:

$$\frac{L}{W} = \frac{100 \text{ m}}{2,2 \text{ m}} = 45,5$$

Pošto se pravi zajednički bazen sa tri smera prolaza otpadne vode, onda je dužina svakog prolaza $100/3 = 33,3 \text{ m}$

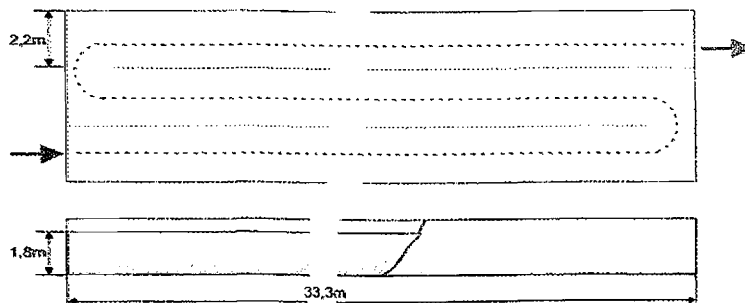
$$L_d = \frac{100 \text{ m}}{3} = 33,3 \text{ m}$$

Zapremina reakcionog bazena je:

$$\begin{aligned} V_d &= H \cdot W \cdot L = (1,8 \text{ m} + 0,6 \text{ m}) \cdot (2,2 \text{ m} \cdot 3) \cdot 33,3 \text{ m} \\ &= 527,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

a zapremina vode u bazenu je:

$$V_L = 1,8 \text{ m} \cdot 2,2 \text{ m} \cdot 100 \text{ m} = 396 \text{ m}^3$$



- 4) Sa ovako određenom zapreminom reakcionog bazena, pri udarnom protoku, vreme kontakta t se računa prema odnosu:

$$t = \frac{396 \text{ m}^3}{0,329 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 20,1 \text{ min}$$

Zadatak 5. Ispitivanja na pilot postrojenju su izvršena u cilju definisanja efikasnosti kombinovanog hlorisanja kao metode dezinfekcije sekundarnog efluenta. Rezultati su pokazali da kada su veličine $b = 2,87 \text{ min} \cdot \text{mg/L}$ i $n = -3,38$, srednja geometrijska koncentracija fekalnih koliformnih bakterija, FC , u efluentu iznosi $14000 \text{ FC}/100 \text{ mL}$. Odredi FC koncentraciju u hlorisanom efluentu pri istoj rezidualnoj koncentraciji hlora od $1,0 \text{ mg/L}$, kada su kontaktna vremena $10, 20$ i 30 min .

Rešenje:

- 1) Za određivanje koncentracije fekalnih koliformnih bakterija, prvo je potrebno definisati proizvod Ct , pa je:

$$C_R \cdot t = 1,0 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 100 \text{ min} = 10 \frac{\text{min} \cdot \text{mg}}{\text{L}}$$

Ova vrednost ukazuje da je:

$$C_R t > b$$

Pa je moguće koristiti jednačinu:

$$\frac{N_t}{N_0} = \left[\frac{(C_R \cdot t)}{b} \right]^{-n}$$

Pri $t = 10 \text{ min}$

$$\frac{N_t}{N_0} = \left(\frac{1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 10 \text{ min}}{2,87 \frac{\text{min} \cdot \text{mg}}{\text{L}}} \right)^{-3,38} = 0,147$$

Pri $t = 20 \text{ min}$

$$\frac{N_t}{N_0} = \left(\frac{1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 20 \text{ min}}{2,87 \frac{\text{min} \cdot \text{mg}}{\text{L}}} \right)^{-3,38} = 0,0141$$

Pri $t = 30 \text{ min}$

$$\frac{N_t}{N_0} = \left(\frac{1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 30 \text{ min}}{2,87 \frac{\text{min} \cdot \text{mg}}{\text{L}}} \right)^{-3,38} = 0,000359$$

2) Pošto je $N_0 = 14000 \text{ FC}/100\text{mL}$, onda se vrednosti koncentracija pri različitim vremenima dobijaju iz prethodno određenih odnosa, pa je:

Pri $t = 10 \text{ min}$

$$N_t = 0,147 \cdot 14000 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}} = 2060 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}}$$

Pri $t = 20 \text{ min}$

$$N_t = 0,0141 \cdot 14000 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}} = 197 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}}$$

Pri $t = 30 \text{ min}$

$$N_t = 0,000359 \cdot 14000 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}} = 5 \frac{\text{FC}}{100 \text{ mL}}$$

Broj testa	Početan broj kolonija $N_0/100\text{ ml}$	Preneti ozon mg/L	Konačan broj kolonija $N_t/100\text{ mL}$	$-\log(N_t/N_0)$
1	95,000	1	1500	1,80
2	470,000	2	1200	2,59
3	3,500,000	5	730	3,68
4	820,000	7	77	4,03
5	9,200,000	14	92	5,00

Zadatak 6. Proceniti dozu ozona koja je potrebna za dezinfekciju filtriranog sekundarnog izliva do najverovatnijeg broja mikroorganizama od $240/100\text{ mL}$ koristeći podatke o dezinfekciji dobijene sa polu-industrijskog postrojenja. Početna koncentracija bakterijskih kolonija je bila $1 \cdot 10^6/100\text{ mL}$, a efikasnost prenosa ozona 80 procenta.

Rešenje:

- 1) Prvo je potrebno odrediti koeficijente u jednačini za dezinfekciju, na osnovu eksperimentalnih podataka. Pošto ozon nema rezidualno dejstvo, ranije korišćena jednačina, koja uključuje koncentraciju rezidualnog hlora:

$$\frac{N_t}{N_0} = \left[\frac{(C_R \cdot t)}{b} \right]^{-n}$$

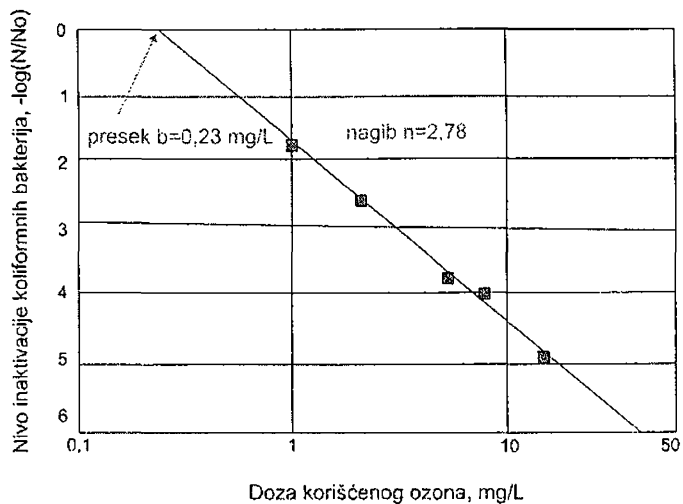
Se modifikuje tako što se proizvod $C_R \cdot t$, zameni ukupno potrebnom dozom ozona, D_{O_3} , pa se dobija jednačina:

$$\frac{N_t}{N_0} = \left[\frac{D_{O_3}}{b} \right]^{-n}$$

Da bi se odredili koeficijenti ove jednačine, neophodno je da se prevede u linearizovan oblik:

$$\log \left(\frac{N_t}{N_0} \right) = -n(\log D_{O_3} - \log b)$$

Odakle se crtanjem u log-log dijagramu, mogu odrediti vrednosti nagiba i odsečka, tj n i b .



Zahtevani koeficijenti su :

$$b = 0,23 \text{ mg/l}$$

$$n = 2,72$$

Određiti dozu ozona potrebnu da se postigne koncentracija bakterijskih kolonija u izlivu od 240 MPN/100 mL.

Kada se prethodna jednačina preuredi i reši po D_{O_3} , dobija se:

$$D_{O_3} = b \left(\frac{N_t}{N_0} \right)^{-1/n}$$

$$D_{O_3} = 0,23 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \left(\frac{240}{10^6} \right)^{-\frac{1}{2,72}} = 4,93 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Pošto se efikasnost prenosa ozona u vodu obavlja sa efikasnošću od 80%, to je ovako izračunatu dozu neophodno uvećati, a što se određuje po jednačini:

$$D = D_{O_3} \left(\frac{100}{E} \right) = 4,93 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \frac{100}{80} = 6,16 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Zadatak 7. Rezultat testa hlorisanja dat u odnosu na procentualnu preživlost bakterije *E.coli* prikazan je u tabeli. Za inaktivaciju od 99%, odrediti koeficijente u jednačini:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-k'c^n \cdot t}$$

Procenat preživelih					
Kontaktno vreme, min ^a					
Slobodan hlor, Cl ^b , mg/L	1	3	5	10	20
0,05	97	82	63	21	0,3
0,07	93	60	28	0,5	–
0,14	67	11	0,7	–	–

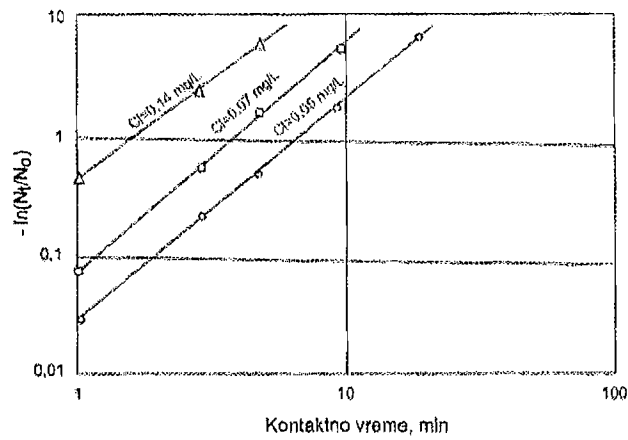
a Uslovi testa, pH = 8,5, T = 5°C

b HOCl (hipohloritna kiselina i ClO⁻, hipohloritni jon)

Rešenje:

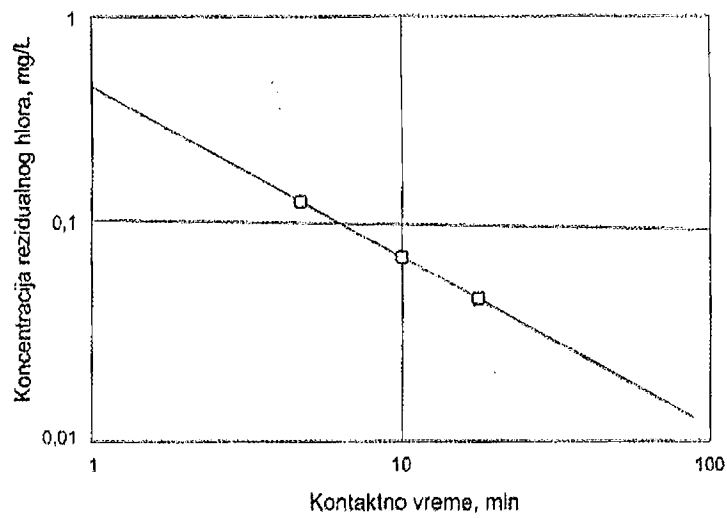
- Da bi se odredili traženi koeficijenti, potrebno je podatke o preživlosti prevesti u log oblik vrednosti a potom crtanjem dijagrama odrediti vreme potrebno za dostizanje potrebnog stepena inaktivacije.

$-\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)$					
Kontaktno vreme, min					
Slobodan hlor Cl, mg/L	1	3	5	10	20
0,05	0,030	0,198	0,462	1,561	5,809
0,07	0,073	0,511	1,273	5,298	–
0,14	0,400	2,207	4,962	–	–



Potrebno vreme kontakta za \log inaktivacionu vrednost od 99 % $[-\ln(N_t / N_0)]$ za različite koncentracije, dato je u tabeli:

Koncentracija, mg / L	Vreme, min
0,05	18,0
0,07	10,0
0,14	4,7



Za određivanje konstanti koristiće se linearni oblik jednačine:

$$\ln C = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[\frac{1}{k'} \left(-\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$\ln C = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \quad (\text{konstantno})$$

Na osnovu prethodnog dijagrama, vrednost n iznosi:

$$\begin{aligned} \text{Nagib} &= -\frac{1}{n} = -\frac{\log 0,5 - \log 0,011}{\log 100 - \log t} = \\ &= -\frac{[-0,30 - (-1,96)]}{2 - 0} = -\frac{1,66}{2} = -0,83 \end{aligned}$$

$$n = 1,20$$

Za vrednost $t = 1$, odsečak je jednak:

$$\text{Odsečak} = \ln 0,5 = \frac{1}{n} \ln \left[\frac{1}{k'} \left(-\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$n(\ln 0,5) = \ln \left[\frac{1}{k'} \left(-\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$1,20(-0,69) = \ln \left[\frac{1}{k'} (-\ln 0,01) \right]$$

$$0,44 = -\left[\frac{1}{k'} (4,61) \right]$$

Konstanta odumiranja mikroorganizama iznosi:

$$k' = -\frac{1}{0,44} (4,61) = -10,48$$

Pa jednačina za dezinfekciju glasi:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -10,48 C^{1,20} t$$

LITERATURA

Alan Scragg, *Environmental Biotechnology* (2005) Oxford University Press Inc.

APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005) 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC.

Arcadio P. Sincero Sr., Gregoria A. Sincero, *Physical–Chemical Treatment of Water and Wastewater* (2002) CRC Press LLC

AWWA, WEF, and APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2003) Am. Public Health Assoc., Washington, DC.

C. C. Lee, Shun Dar Lin, *Handbook of Environmental Engineering Calculations* (2007) McGraw-Hill Inc.

Chick, H., *An Investigation of the Laws of Disinfection* (1908) Journal of Hygiene, vol. 8, pp. 92–158.

David L. Russell, PE, *Practical Wastewater Treatment* (2006) John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey

Davis, M. L. and D. A. Cornwell, *Introduction to Environmental Engineering* (2008) McGraw-Hill, Boston, Massachusetts.

E. Roberts Alley, *Water quality control handbook* (2007) The McGraw-Hill

Edward E Baruth, *Water treatment plant design* (2005) American Water Works Association, McGraw-Hill

Frank R. Spellman, *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (2009) 2nd ed., Taylor & Francis Group, LLC

Frank R. Spellman, *Mathematic Manual for Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (2004) CRC Press LLC

- Gabriel Bitton, *Wastewater microbiology* (2005) John Wiley & Sons Inc.
- Gerardi , M. H., *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process* (2002) Wiley - Interscience , New York.
- Gerardi , M. H., *Microscopic Examination of the Activated Sludge Process* (2008) John Wiley & Sons , Hoboken, NJ .
- Grady, C. P. L., Jr., G. T. Daigger, and H. C. Lin, *Biological Wastewater Treatment* (1999) 2nd ed., Marcel Dekker, New York.
- Hansjoachim Stechemesser, Bohulav Dobias, *Coagulation and Flocculation* (2005) 2nd ed., Taylor & Francis Group
- H. Freundlich, *Colloid and Capillary Chemistry*. Methuen & Co., London, (1926).
- i. Langmuir, *The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum*, J. Amer. Chem. Soc. 40, 1361 (1918).
- J. Monod, *Recherches sur la Croissance des Cultures Bacteriennes*, Herman, Paris (1942).
- James K. Edzwald, *Water Quality & Treatment, A Handbook on Drinking Water* (2011) American Water Works Association, McGraw-Hill
- James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc., *Water Treatment Principles and Design* (1985) John Wiley & Sons, New York.
- Jhon C. Crittenden, R. Rhodes Russell, David W. Hand, Kerry J. Howe, Georg Tchobanoglous, *Water Treatment: Principles and Design* (2005) 2nd ed., Jhon Wiley & Sons, Inc.
- L. K. Wang, L. Kurylko, and M. H. S. Wang. *Gas Dissolving and Releasing Liquid Treatment System*. US Patent 5167806. US Patent & Trademarks Office, Washington, DC, (1992).
- L. K. Wang, Y. T. Hung and N. K. Shamas (eds.), *Physicochemical Treatment Processes* (2004) Humana Press, Totowa, NJ..
- L. K. Wang, Y. T. Hung and N. K. Shamas (eds.), *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (2005) Humana Press, Totowa, NJ

- L. K. Wang, Yung-Tse Hung, Nazih K. Shamma, *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (2006) Handbook Of Environmental Engineering, V 4, Humana Press Inc.
- L. K. Wang, Y. T. Hung, and N. K. Shamma (eds.), *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (2006) Humana Press, Totowa, NJ.
- L. K. Wang, N. K. Shamma, and Y. T. Hung (eds.), *Advanced Biological Treatment Processes* (2009) Humana Press, Totowa, NJ.
- Lawrence K. Wang, Yung-Tse Hung, Nazih K. Shamma, *Physicochemical Treatment Processes* (2005) V3, Handbook of environmental engineering, Humana Press Inc.
- Lawrence K. Wang, Yung-Tse Hung, Nazih K. Shamma, *Advanced Physicochemical Treatment Technologies* (2007) V5 Handbook Of Environmental Engineering, Humana Press Inc.
- Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, Yung-Tse Hung, *Biological Treatment Processes* (2009) V8, Handbook of Environmental Engineering, Humana Press, LLC,
- Lewis, W. K., and W. G. Whitman, *Principles of Gas Absorption* (1924) Industrial Engineering Chemistry, V16, p. 1,215.
- Mackenzie L. Davis, *Water and Wastewater Engineering (Design Principles and Practice)* (2010) McGraw-Hill Companies, Inc.
- Monod, J., *The Growth of Bacterial Cultures* (1949) Annual Review of Microbiology, vol. 3, pp. 371–394.
- M. Moo-Young (ed.), *Bioreactor Immobilized Enzymes and Cells Fundamentals and Applications* (1988) Elsevier Applied Science, New York.
- M. H. Gerardi, *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process* (2001) Wiley-Interscience, NY.
- McCabe, W. L., J. C. Smith, and P. Harriot *Unit Operations of Chemical Engineering* (2005) McGraw-Hill, Boston, Massachusetts
- Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse* (2003) 4th ed., McGraw-Hill.

Metcalf and Eddy, Inc., *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications* (2007) McGraw-Hill

Michael H. Gerardi, *Troubleshooting the Sequencing Batch Reactor* (2010) John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Municipal Water Treatment Technology: Recent Developments, USEPA (1993)

Nelson L. Nemerow, Franklin J. Agardy, Patrick Sullivan, And Joseph A. Salvato, *Water, Wastewater, Soil, and Groundwater Treatment and Remediation* (2009) 6th ed., Environmental Engineering, John Wiley & Sons, Inc.

Nicholas P. Cheremisinoff, *Handbook Of Water And Wastewater Treatment Technologies* (2002) Butterworth-Heinemann.

O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering* (1972) 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.

R. Munter, *Advanced Oxidation Processes-Current Status and Prospects* (2001) Proc. Estonian Acad. Sci. Chem. 50, 59–80.

R. J. Wakeman, E. S. Tarleton, *Solid/Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment* (2005) Elsevier Ltd.,

R. Crites and G. Tchobanoglous, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems* (1998) McGraw-Hill NY, NY.

Raymond D Letterman, *Water Quality and Treatment* (1999) 5th ed., McGraw-Hill, Inc.

Rittmann, B. E. and P. L. McCarty, *Environmental Biotechnology: Principles and Applications* (2001) McGraw-Hill, Boston, Massachusetts.

Robert H. Perry, Don W. Green, James O. Maloney, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (1999) 7th ed., McGraw-Hill

Shun Dar Lin, *Water and Wastewater Calculations Manual* (2007) Second Edition, McGraw-Hill Companies, Inc.

T. K. Sherwood and R. L. Pigford, *Absorption and Extraction* (1952) McGraw-Hill, New York.

Tom D. Reynolds, Paul A. Richards, *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering* (1996) 2th ed., Cengage Learning, Stamford

T. Wik, *Adsorption and Denitrification in Nitrifying Trickling Filters* (1999) *Wat. Res.* 33(6), 1500–1508.

Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski, *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment* (2007) Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

W. W. J. Eckenfelder, *Industrial Water Pollution Control*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2000.

INDEKS POJMOVA

A

adsorbat, 105
adsorbens, 106
adsorpcija, 105, 303
aeracija, 108, 316, 424
aeratori, 110
aerobni procesi, 123
afinitet, 131
agregat, 170
agregatno taloženje, 64, 252
aktivni mulj, 12, 143, 144, 173, 181, 398
akumulacija, 14
alge, 14, 99, 142
alkalitet, 8, 198, 199, 425
alkalne, 95
aluminat, 80
aluminijum hlorid, 80
amini, 13
amino kiseline, 14
amonijak, 14, 15, 103, 125, 161, 163
amonijum jon, 182
anaerobni, 124, 193, 199, 200, 201
anaerobni procesi, 122, 124
analiza, 22, 24, 175
anamoks, 167
anjonski, 81
anoksi, 124, 166, 167
aparat, 28
apsorpcija, 33, 108
Arenijusova jednačina, 109, 204
aromatični ugljovodonici, 20
arsen, 92
asimilacija, 166
atmosferski, 112, 210
azot, 8, 14, 15, 22, 125, 161, 165, 167

B

bakar, 15, 92
bakterije, 8, 26, 27, 142, 149, 161, 162, 163, 164, 194, 195, 196, 198, 378, 413, 420, 450, 488
belančevine, 193
benzen, 20
Bernulijeva jednačina, 51
bilans mase, 108
bilans supstrata, 140
biodisk, 444
biofilter, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 448, 455, 466
biološka obrada, 327, 329, 374
biološka potrošnja kiseonika, 21
biološki tretman, 121
bionerazgradivi, 474
bioproceni, 131, 132
biorazgradivi, 367, 372, 474
bioreaktor sa potpunim mešanjem, 199
BOD, 125
Bohart-Adamsova konstanta, 310
boja, 9
borat, 13
BPK, 22
brzina odnošenja, 56
brzina prenosa kiseonika, 322, 336, 380

C

celuloza, 193
cevovod, 321
ciklus, 1
cink, 15, 92

D

denitrifikacija, 161, 166, 167

deterženti, 34
dezinfekcija, 203
disimilacija, 166
diskontinualni procesi, 131

E

egalizacija, 49, 225
egalizacioni bazen, 37
egzogeni izvor, 168
ekenfelder, 113
eksperiment, 171, 173
ekvivalent, 20, 149, 168
ekvivalentni stanovnik, 24
elektron, 102, 166, 167, 168, 194, 195, 301
energija, 204
enzim, 167
estri, 16

F

faktor oblika, 51
faktor snage, 84
faza, 10, 41, 94, 130, 170, 193, 194, 195, 477
fenol, 19, 99, 303, 304, 305, 306, 307
fenomen, 105
feri, 283, 284
fermentacija, 472
filamentozne bakterije, 26
filtracija, 33
filtrat, 10
fizičko-hemijski, 79, 136
flokula, 64, 79, 81, 142, 180
flokulacija, 77, 87, 265
flokulator, 269, 271, 279, 280
flotacija, 71, 73, 74, 75, 256
Ford, 113
fosfor, 8, 14, 125, 169, 291
fotosinteza, 33
frakcija, 10, 11, 12, 21, 122, 146, 254, 474
Frojdliihova izoterma, 106
fungicid, 18

G

gasovi, 8
glukoza, 148

gradijent, 87, 89, 265, 268, 269, 271, 279, 280
gustina, 54, 56, 57, 84, 85, 86, 186, 257, 261, 262, 263, 285, 297, 307, 446, 449, 481
gvožđe, 14, 15
gvožđe-hlorid, 80
gvožđe-sulfat, 80

H

hemijska industrija, 4
hemijska potrošnja kiseonika, 9, 21
hemostat, 132
Henrijeva konstanta, 108, 109, 332, 334, 335
heterotrofne bakterije, 164
hidraulički radijus, 48, 210
hidrauličko mešanje, 88, 89
hlor, 15, 33, 99, 101, 103, 302, 480
hlorisanje, 31, 103, 301, 482
hranjive podloge, 132, 135
hrapavost, 210, 212, 214, 216, 219
hrom, 15
huminske, 99

I

idealno mešanje, 133, 159, 160, 365, 368
idealno proticanje, 159, 160
imobilisani mikroorganizmi, 184

J

jodometrijska titracija, 16
joni, 78, 79, 90, 92, 99
jonska izmena, 95
jonska jačina, 79, 92, 97, 298

K

Kinetički model, 137
kinetički parametar, 129, 130, 131, 132, 341
kinetički parametri, 127, 339, 355, 357, 358, 360, 362, 363, 365, 368, 370, 413
kinetika, 132, 163, 196

kiselina, 14, 16, 18, 95, 99, 101, 163,
194, 195, 196, 199, 488
kiseonik, 8, 15, 21, 22, 23, 99, 108, 149,
150, 151, 182, 318, 337, 428
koagulacija, 77, 79, 265
koagulant, 37, 79, 81
koeficijent prinosa, 373
koloidi, 32, 80, 81
koloidne čestice, 77, 78, 79, 80, 81
kompleksi, 80
komunalne otpadne vode, 1, 25, 30,
142, 160, 166, 237, 239, 244, 247,
398, 404, 405
konstanta ravnoteže, 102, 300
konstanta zasićenja supstratom, 165
kontinualni procesi, 132
kontrola, 15, 161
konvencionalni sistem, 34, 39
kreč, 95, 285, 296, 297
krečno mleko, 95

L

laguna, 142
laminarno strujanje, 85
Langelier, 96
Lengmirova izoterma, 307
letvaste mešalice, 82, 87, 88
linije obrade, 29, 31, 32, 34
lopataste mešalice, 82
Ludžak-Etinger, 166

M

magnezijum, 13
makronutritijenti, 8, 32, 33
maksimalna specifična brzina, 129
mangan, 15
maseni bilans, 148
maseni protok, 73, 115, 176, 256, 257,
258, 259, 260, 261, 262, 263, 320,
326, 337
masne kiseline, 195
masti, 8, 16, 17, 41, 43
mehanički tretman, 43
mehur, 17, 71, 72
merači, 37
merjenja, 6, 31, 44, 173, 330, 332
merjenje protoka, 43, 44
mešalica, 82, 84, 88, 89, 267

mešanje, 81, 82, 83, 86, 87, 198, 265,
266, 267, 268, 269, 298
metabolizam, 182
metal, 15
metan, 8, 15, 122, 195, 198, 201
mikroorganizmi, 9, 12, 22, 26, 124, 151,
181, 194, 201
mineralni, 144
miris, 13, 99
mlaznica, 184
model, 131, 159
Monodov model, 131
mulj, 34, 39, 285, 290
mutnoća, 9

N

napredne tehnike, 39
natrijum, 80, 90, 95, 302, 425
natrijum hipohlorit, 302
neorganski, 41, 99, 143
Nernstov potencijal, 78
neutralizacija, 94, 95, 302
nitrat, 14, 166, 169
nitrifikacija, 125, 161, 163, 449
nitrit, 14, 161, 163, 166, 167, 168
Nitrobacter, 26, 163, 165
Nitrosomonas, 26, 163, 165
Nocardia, 26
nosači, 40, 124, 181, 183, 455
nosači, 181
nutrijenti, 14, 33, 182

O

oksidacija, 20, 99, 161, 163, 300
oksidans, 99
okvašeni obim, 211, 224
olovo, 15
organski ugljenik, 24, 36, 420
organsko opterećenje, 142, 458, 466,
470
ozon, 100, 101

P

pakovanje, 181, 189, 190, 310, 311
patogeni, 27
pena, 17

periferna brzina, 86, 269, 271, 273,
275, 278, 279, 280
peroksid, 99, 101
pesak, 181
peščana filtracija, 33
peskolov, 237, 238, 241, 242
pesticidi, 19
pH, 80, 94, 425
piridin, 20
plesni, 8, 26
postupci prečiščavanja, 142, 143
potreba za kiseonikom, 321, 328, 329
potrošnja vode, 7, 161
povezivanje, 21
precipitacija, 90, 283
prečiščavanje, 1, 2, 3, 4, 7, 12, 13, 28,
29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 41, 44,
119, 122, 123, 135, 148, 152, 161,
181, 191, 234, 377, 482
primarna obrada, 41
prinos, 132, 136, 137, 149, 163, 164,
197, 417, 421, 423, 428
pritisak, 73, 108, 112, 113, 114, 115,
116, 117, 127, 186, 210, 256, 320,
321, 324, 325, 326, 327, 329, 330,
396
propelerska mešalica, 267
protočni, 83
protozoe, 8, 26, 27
provodljivost, 10, 24
Pseudomonas, 26
puferna moč, 198
puferni kapacitet, 198

R

radijus, 211, 215
radionukleotid, 77
rastvor, 24, 79, 90, 480, 482
rastvoreni kiseonik, 318
rastvorljivost, 9, 15, 16, 256, 323
ravnoteža, 106, 130
reakcija, 9, 80, 93, 100, 101, 102, 103,
163, 195, 300
reaktor, 37, 39, 132, 133, 145, 155,
159, 173
recipijent, 37, 94, 121, 166, 203
recirkulacija, 143, 152, 200, 372, 385,
462
redukcija, 166

Rejnoldsov broj, 88
remedijacija, 39
rešetke, 51, 235
rezidualne, 205
Rizner, 96, 299
rotifere, 26

S

samoprečiščavanje, 121
sanitarne odpadne vode, 1, 16, 25, 26,
147, 463, 464
sekundarna obrada, 119
sekundarni tretman, 119, 372
sekvencionalni, 201
separator, 41
sloj, 65, 78, 79, 172, 176, 179, 181, 182,
184, 187, 444
specifična brzina, 165
specifična brzina rasta, 165
standard, 26
starost biomase, 143, 156
stehiometrija, 148, 151
stepen, 4, 13, 29, 31, 32, 41, 60, 70, 71,
184, 185, 186, 196, 418
sterilizacija, 39
stešnjeno taloženje, 53
sulfat, 33, 80, 90
sulfid, 8, 13, 14, 15, 93
sumpor, 95
supstrat, 124, 182, 378, 400, 402, 406
suspendovane čestice, 12, 111, 143,
144
suspendovane materije, 144, 370

T

taloženje, 31, 33, 53, 57, 64, 66, 69, 90,
91, 143, 151, 170, 171, 172, 173,
178, 240, 242, 243, 244, 285, 429,
455
tehnika, 39, 72, 203
tehnološke operacije, 28
temperatura, 9, 16, 98, 117, 265, 328,
329, 337, 377, 394, 444, 463, 471,
477
termičko zagađenje, 30
toksičnost, 161
trakaste mešalice, 82

trenje, 54, 55, 56, 86, 88, 268, 269,
271, 273, 278, 279, 280, 332

turbinska mešalica, 82

turbulentno strujanje, 85

U

ugljen-dioksid, 8, 15, 127, 163, 195

V

Vinklerov test, 16

Z

zagađenje, 9, 24, 28, 29, 119, 121, 127,
159, 161, 164, 166, 167, 168, 444,
461

zapreminski koeficijent prenosa mase
kiseonika, 109

zapreminski protok, 309

Zeta potencijal, 79

zonalno taloženje, 178