



FKITMCMXIX

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije



Reaktori i bioreaktori

Inženjerski zahtjevi pri projektiranju bioreaktora

prof. dr. sc. Zvezdana Findrik Blažević

Inženjerski zahtjevi pri projektiranju bioreaktora

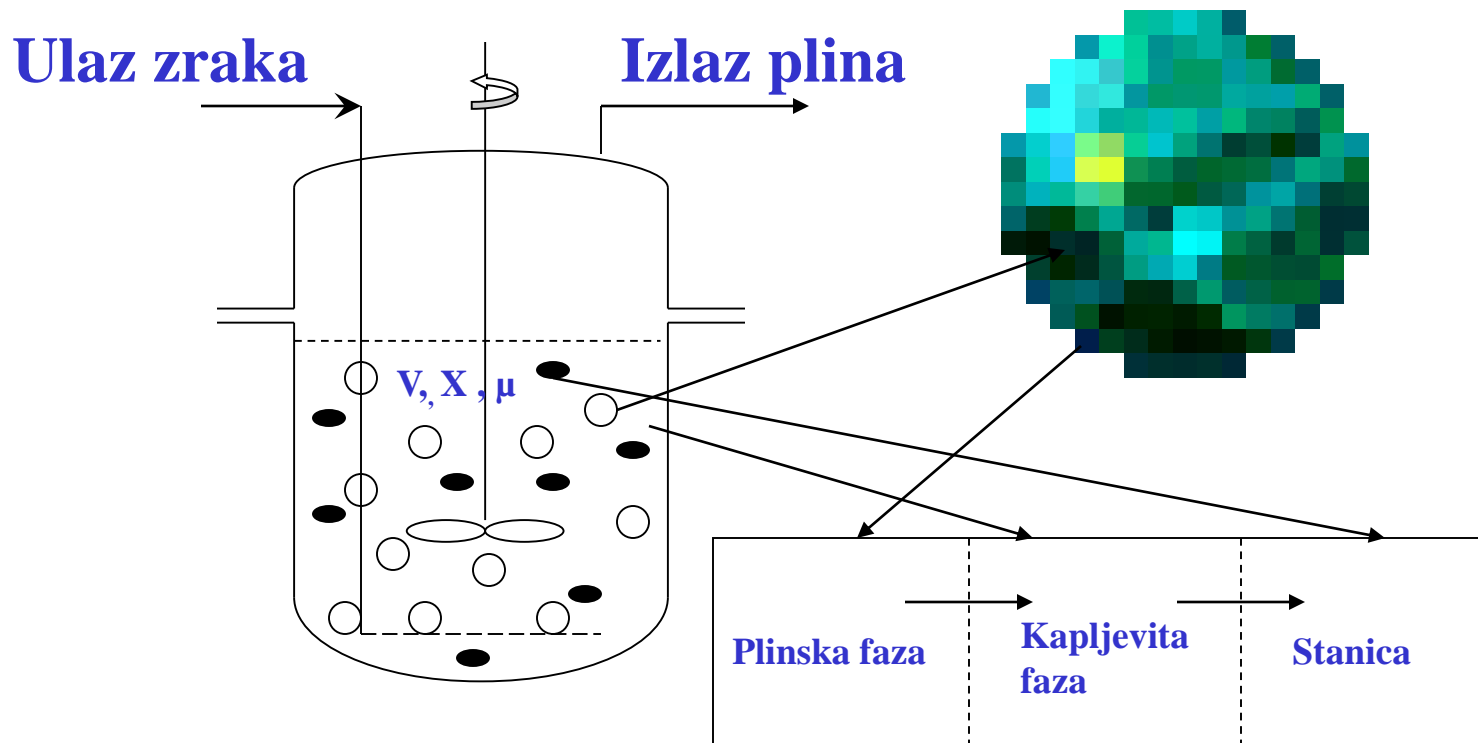
- 1. Snabdijevanje biomase kisikom – aeracija – prijenos tvari plin-kapljevina-krutina**
- 2. Miješanje i strujanje reakcijske smjese**
- 3. Odvođenje topline**

Prijenos tvari u biološkim sustavima

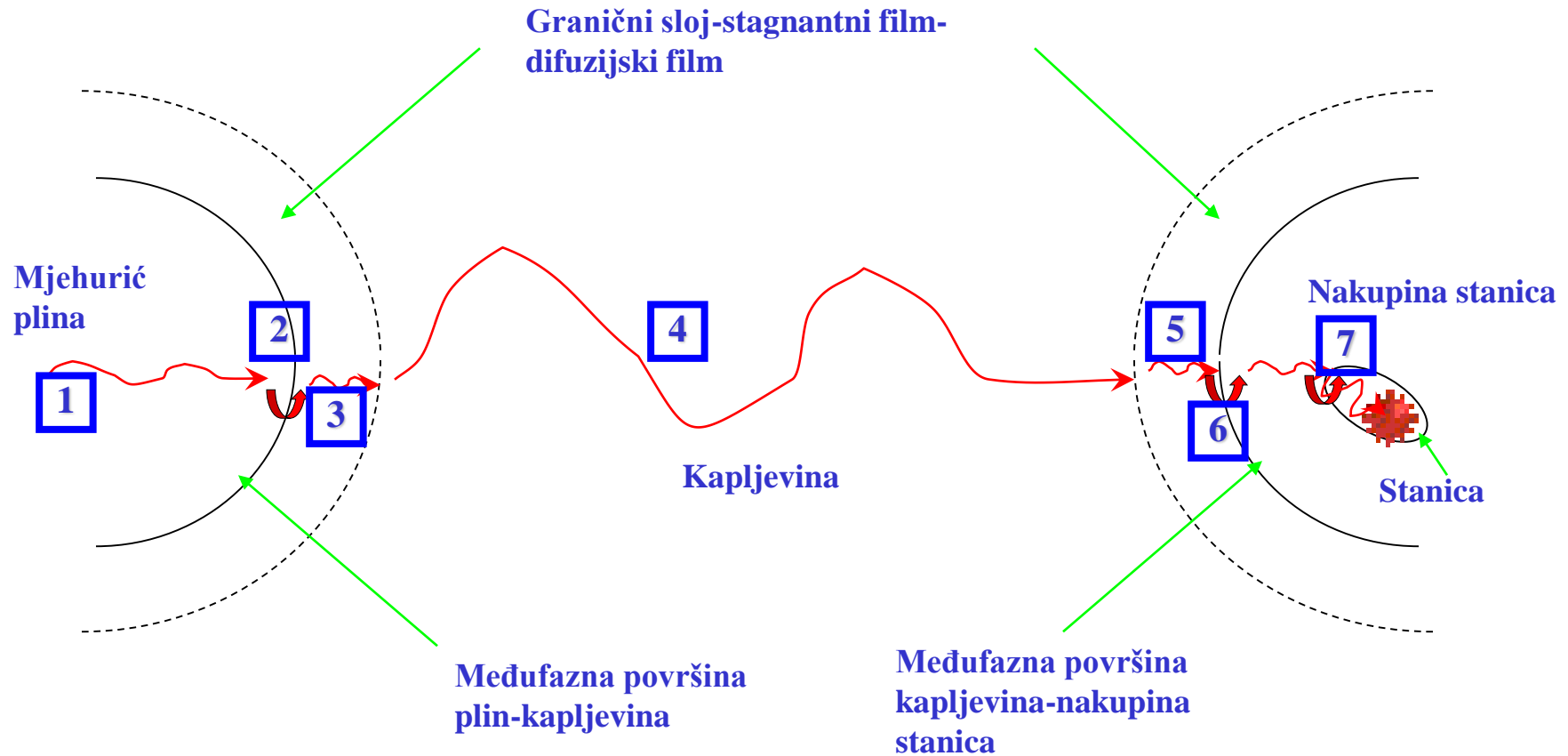
Teško topljivi plin, obično kisik, se iz izvora, obično zračnog mjehurića prenosi u kapljevitu fazu u kojoj se nalaze stanice. Kisik mora pri ovom prijenosu savladati **niz otpora** čija veličina **ovisi o hidrodinamici mjehurića, temperaturi, aktivnosti i gustoći stanica, sastavu otopine, fenomenima na granici faza i drugim faktorima.**

Aeracija

Aeracija je operacija dovođenja zraka u bioreaktore, a čine je prijenos tvari i apsorpcija.



Prijenos tvari u biološkim sustavima



Operacija kojom dovodimo zrak u reaktor se zove aeracija. Sastoji se iz prijenosa tvari iz plinske u kapljevitu fazu; te iz otapanja plina u kapljevini. Kisik prolazi kroz niz granica faza (i graničnih slojeva) koje predstavljaju otpore. Molekula kisika mora savladati otpor čija veličina ovisi o temperaturi, miješanju, strujanju, gustoći stanica itd. Taj se sloj formira i oko stanice; O_2 mora savladati čitav niz otpora; ukupna brzina cijelog procesa je određena najsporijim procesom.

Prijenos tvari u biološkim sustavima

Moguće kombinacije otpora prijenosu tvari:

- 1. Difuzija iz plina na međufaznu površinu plin-kapljevina**
- 2. Prolaz kroz međufaznu površinu plin-kapljevina**
- 3. Difuzija otopljene tvari kroz stagnirajući film oko mjehurića**
- 4. Prijenos otopljene tvari kroz kapljevinu u drugi stagnirajući film.**
- 5. Prijenos tvari kroz drugi stagnirajući film oko stanice.**
- 6. Difuzijski prijenos tvari u stanične nakupine, micide ili čvrste nakupine stanica**
- 7. Prijenos tvari kroz staničnu membranu u unutrašnjost stanice.**

Prijenos tvari u biološkim sustavima

APSORPCIJA

Apsorpcija je proces u kojem se jedna ili više komponenti iz plinske faze apsorbiraju (otapaju i/ili reagiraju) u kapljevitoj fazi.

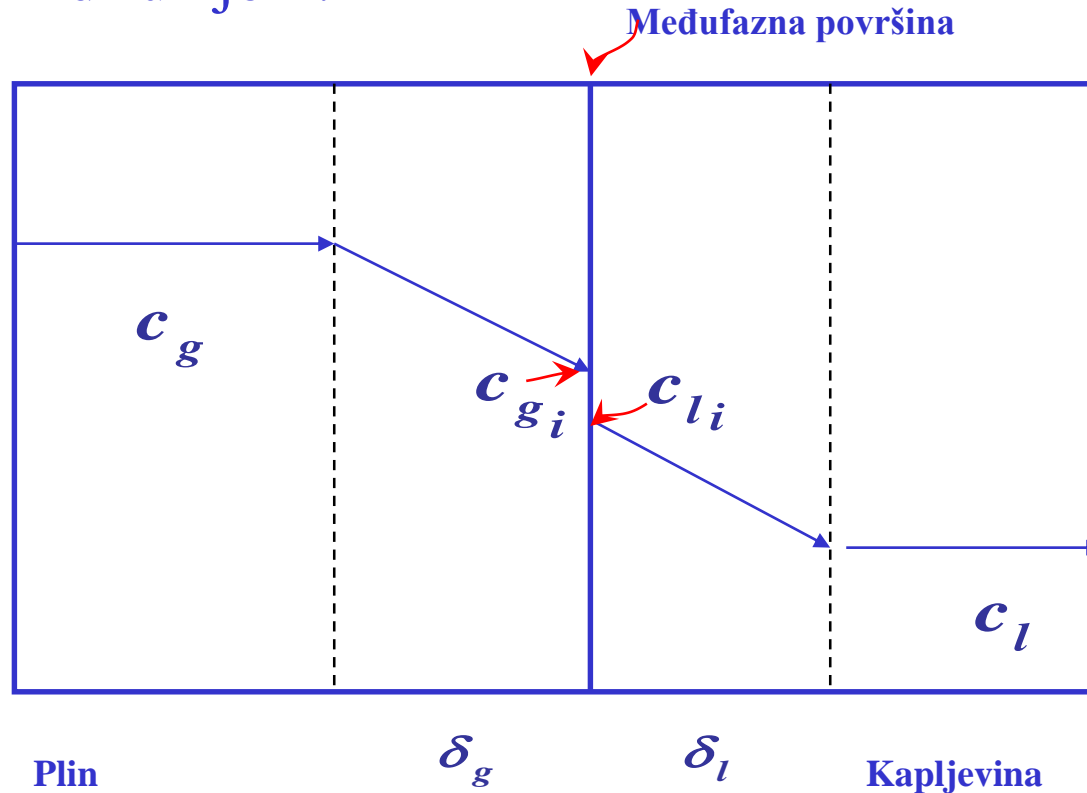
Henry-ev zakon:

$$c_{gi} = He \cdot c_{li}$$

Za teško topljive tvari je Henry-eva konstanta He mnogo veća od 1.

Prijenos tvari u biološkim sustavima

Model “dva filma” opisuje prijenos plina kroz međufaznu površinu molekularnom difuzijom.



Na granici faza plin-kapljevina dolazi do formiranja hidrodinamičkog graničnog sloja. Prijenos tvari se u tom sloju odvija difuzijom. Pokretačka sila difuzije je koncentracijski gradijent, tj. razlika koncentracija u masi plina (ili kapljevine) i koncentracije tvari na granici faza.

Prijenos tvari u biološkim sustavima

U stacionarnom stanju je brzina prijenosa kisika prema međufaznoj površini plin-kapljevina jednaka brzini prijenosa kroz film kapljevine. Ako su c_g i c_l koncentracije kisika u plinu i kapljevini mogu se napisati dvije brzine prijenosa

$$N_{O_2,g} = k_g \cdot (c_g - c_{g_i}) \quad \text{strana plina}$$

$$N_{O_2,l} = k_l \cdot (c_l - c_{l_i}) \quad \text{strana kapljevine}$$

N_{O_2} - fluks kisika ($\text{mol O}_2/\text{cm}^2\text{s}$)

k_g i k_l – koeficijent prijenosa tvari (cm/s)

c_l i c_g – koncentracije kisika u masi kapljevine i plina ($\text{mol O}_2/\text{cm}^3$)

c_{l_i} i c_{g_i} – koncentracije kisika u masi kapljevine i plina ($\text{mol O}_2/\text{cm}^3$)

Pojave na granici faza su teorijske i ne možemo ih mjeriti ili izraziti preko mjerenih veličina.

Prijenos tvari u biološkim sustavima

Budući da je koncentracije na granici faza c_{gi} i c_{li} nemoguće mjeriti potrebno je izraz za brzinu prijenosa izraziti preko nekog ukupnog koeficijenta prijenosa K_l i ukupne koncentracijske razlike ($c_l^* - c_l$), gdje je c_l^* koncentracija u kapljevitoj fazi koja je u ravnoteži s plinskom fazom prema

$$c_g \equiv He \cdot c_l^*$$

Ukupni koeficijent prijenosa:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{He \cdot k_g}$$

Tipično je da je k_g značajno veća konstanta od k_l . Uz ove činjenice je K_l približno jednaka k_l . Prema tome je sav značajan otpor prijenosu tvari na strani filma kapljevine.

$$N_{O_{2,l}} = K_l \cdot (c_l^* - c_l)$$

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

$$Q_{O_2} = \text{brzina prijenosa kisika} = \frac{(\text{Fluks})(\text{Medfaz. površina})}{\text{Volumen kapljevine u reaktoru}}$$

$$Q_{O_2} = k_l \cdot (c_l^* - c_l) \cdot \frac{A}{V}$$

Međufazna površina plin-kapljevina je:

$$a' = \frac{A}{V}$$

$$k_l = \frac{D}{\delta_L}$$

D – difuznost plina u kapljevini
 δ_L – debljina filma

Prema modelu dva filma

$$Q_{O_2} = k_l \cdot a' (c_l^* - c_l)$$

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

$k_L a'$ je ukupni volumni koeficijent prijenosa kisika

$k_L a'$ ovisi o:

- hidrodinamičkim uvjetima u bioreaktorima;
- miješanju i protoku plinske faze kroz reakcijski medij,
- sastavu kapljevite faze i plinske faze,
- napetosti površine kapljevite faze,
- temperaturi,
- gustoći
- viskozitetu i dr.

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Relativna granična međufazna površina a' je proporcionalna ukupnoj površini plin-kapljevina $A_{G/L}$ sa strane kapljevine i suma je svih pojedinačnih površina mjehura plinske faze u kapljevitoj fazi

$$A_{G/L} = \sum_{i=1}^N (a_{G/L})_i$$

Površina mjehura se **eksperimentalno određuje** pomoću različitih metoda. Najjednostavnija je **direktno fotografiranje disperzija** i određivanje srednjeg promjera mjehura uz istovremeno mjerenje ukupnog volumena plinske faze u kapljevini

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Površina je ovisna o promjeru pojedinih mjehura, a promjer mjehura o:

- 1. načinu formiranja mjehura,**
- 2. gustoći kapljevite i plinske faze,**
- 3. viskoznosti kapljevite faze,**
- 4. protoku plinske faze,**
- 5. miješanju**
- 6. napetosti površine, gravitaciji, geometriji otvora i konstrukciji aeratora**

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Promjer mjehura se računa ovisno o tome da li je bioreaktor bez ili s mehaničkim mješalom

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Bioreaktori bez mehaničkog miješanja

veličina međufazne granične površine ovisi o protoku plinske faze

Mali protoci – mjehuri iste veličine

Veliki protoci – lanci mjehura – koalescencija – veliki nepravilni mjehuri

Promjer mjehura se dobije iz bilance sila koje djeluju na mjehur (uzgon, sila teža, sila površinske napetosti)

$$d_m = 3 \sqrt{\frac{6\sigma d_o}{g(\rho_L - \rho_G)}}$$

gdje je d_o promjer otvora aeratora, a σ napetost površine
za praktičnu primjenu su pogodni slijedeći izrazi:

za promjer otvora na aeratoru 0,1-1cm

$$d_m = 0,19 d_o^{0,48} Re_o^{0,32}$$

$$d_m = 0,18 \sqrt{d_o} \sqrt[3]{Re_o}$$

za $Re < 200$

$$d_m = 0,71 Re_o^{-0,05}$$

za $Re > 1000$

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Bioreaktori s mehaničkim miješanjem

$$d_m = k \sqrt[5]{\frac{\sigma^3}{\frac{P^2}{V_L^2} \rho_L}}$$

gdje je P/V_L inercijska sila mješala

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Ukupni volumni koeficijent prijenosa kisika $k_l a'$ i snaga potrebna za miješanje u bioreaktorima:

$$k_l a' = \lambda \cdot \left(\frac{P}{V_l} \right)^m \cdot u_g^n$$

Šaržni bioreaktor, voda, koalescirajući mjehurići:

$$k_l a' = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{P}{V_l} \right)^{0,4} \cdot u_g^{0,5}$$

$$(V_l \leq 2600 \text{ L}; 500 < P/V_l < 10\,000 \text{ W/m}^2)$$

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Šaržni bioreaktor, voda, nekoalescirajući mjehurići:

$$k_l a' = 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{P}{V_l} \right)^{0,7} \cdot u_g^{0,2}$$

$$(2 < V_l < 4400 \text{ L}; 500 < P/V_l < 10\,000 \text{ W/m}^2)$$

Kolonski bioreaktor, voda, koalescirajući mjehurići:

$$k_l a' = 0,32 \cdot u_g^{0,7}$$

$$u_g = \frac{q_v}{A \cdot H}$$

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Određivanje brzine prijenosa kisika:

Brzina se određuje u sintetičkom mediju koji oponaša stvarni medij i s njim mora imati identična slijedeća svojstva:

- **Viskoznost i druge reološke značajke**
- **Međufazni plin-kapljevina otpor**
- **Tendenciju koalescencije mjehurića**
- **Topljivost i difuznost kisika**

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Metode određivanja volumnog koeficijenta prijenosa kisika $k_L a$

Indirektne metode

Direktne metode

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

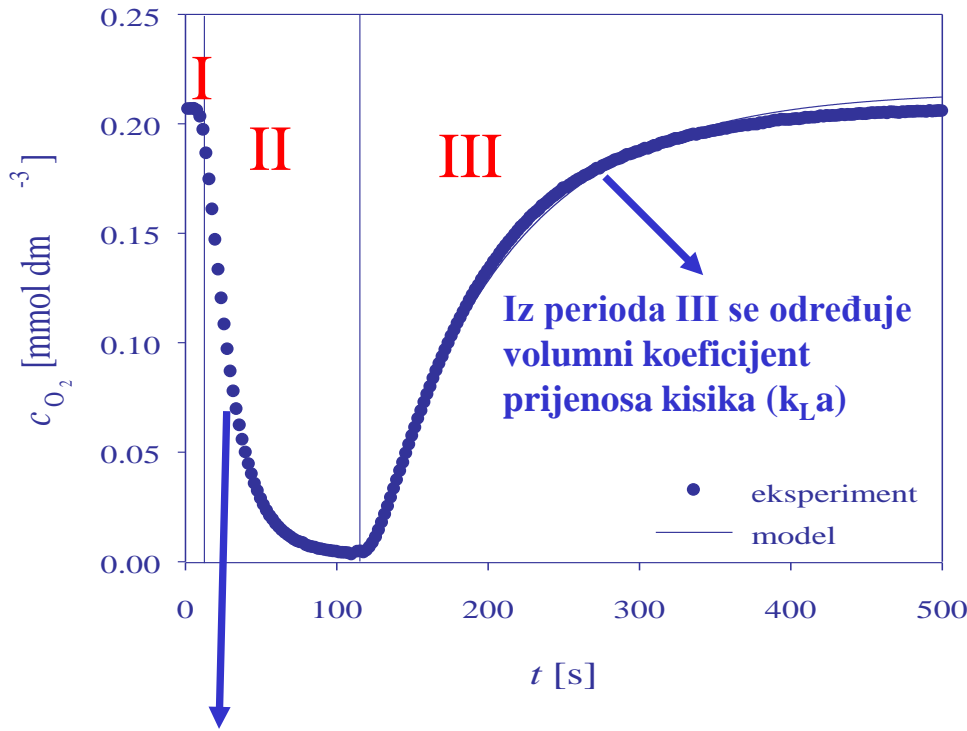
Indirektne metode

- **Integralna metoda** - promjena koncentracije O_2 s vremenom na skokovitu (step) pobudu

$$c_A = c_A^* \cdot \left(1 - e^{-k_l a' \cdot t}\right)$$

- Metoda elektrodnog momenta
- Sulfitno – oksidna metoda
- CO_2 metoda
- Metoda oksidacije glukoze

Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora – **integralna metoda**



U periodu II se upuhuje dušik u reaktor, kako bi se istjerao sav kisik

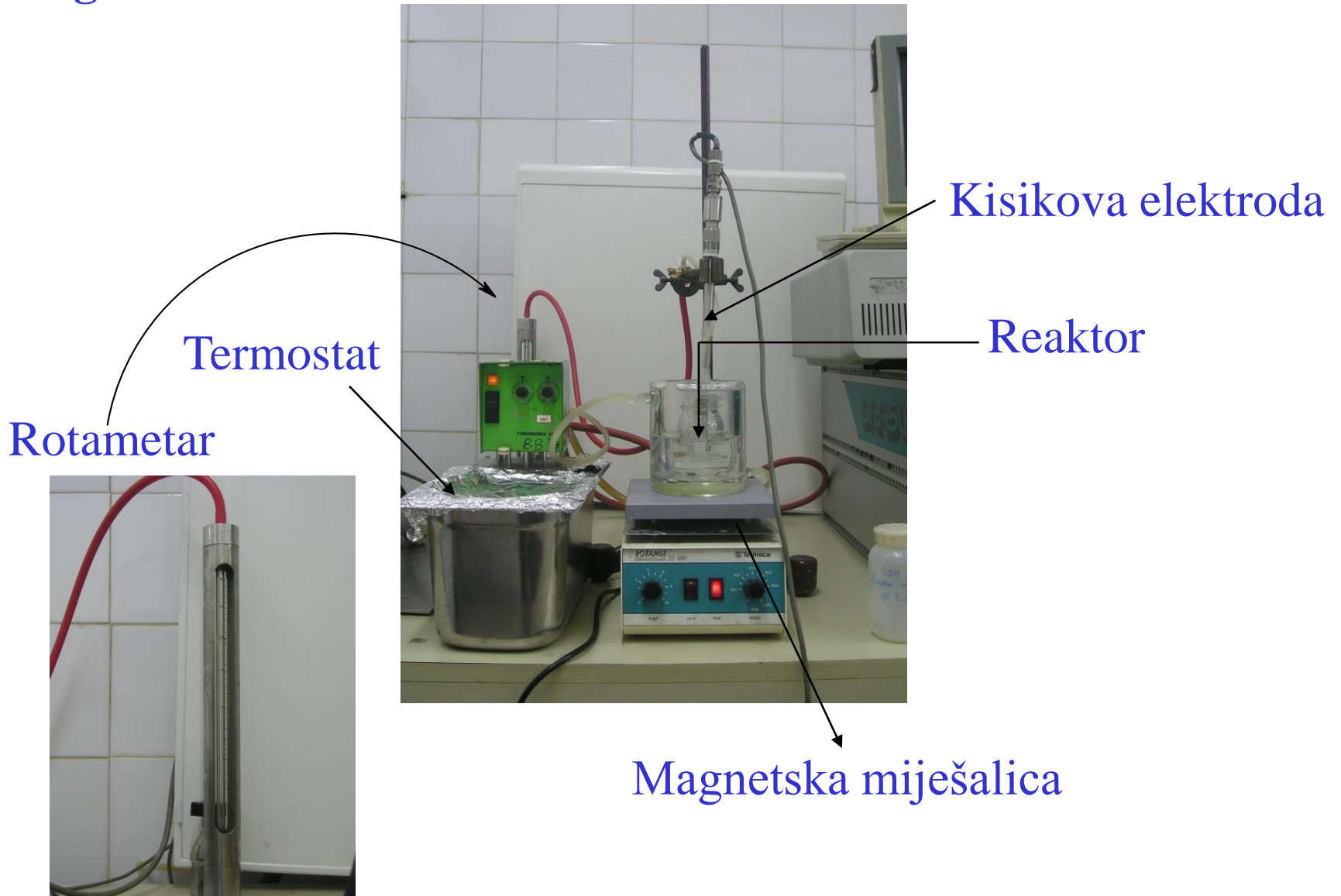
Iz perioda III se određuje volumni koeficijent prijenosa kisika ($k_L a$)

Metoda se sastoji od praćenja postotka zasićenosti kisikom tijekom vremena u reaktoru. Kako bi se procijenila vrijednost volumnog koeficijenta prijenosa kisika provodi se slijedeći postupak. Ispuhuje se sav kisik iz reaktora upuhivanjem dušika (period II na slici), a nakon što koncentracija kisika padne na 0, započinje se s aeracijom. Iz perioda III se određuje volumni koeficijent prijenosa kisika ($k_L a$) iz bilance tvari za kisik:

$$\frac{dc_{O_2}}{dt} = k_L a \cdot (c_{O_2}^* - c_{O_2})$$

Ovisno o protoku zraka (kisika) i brzini miješanja u reaktoru stupanj zasićenosti kisikom u reaktoru će se mijenjati sporije ili brže. Kod veće brzine miješanja i višeg protoka zraka volumni koeficijent prijenosa kisika će biti veći.

Aparatura za određivanje volumnog koeficijenta prijenosa kisika integralnom metodom



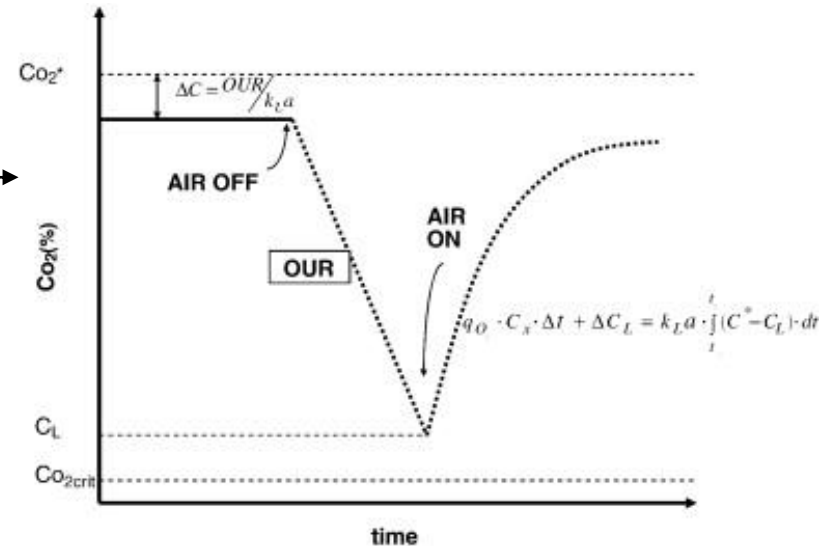
Brzina prijenosa kisika po jediničnom volumenu bioreaktora

Direktne metode

- Metoda bilance plinova
- **Dinamička metoda** →

$$\frac{dc_A}{dt} = OUR = -q_o \rho_x$$

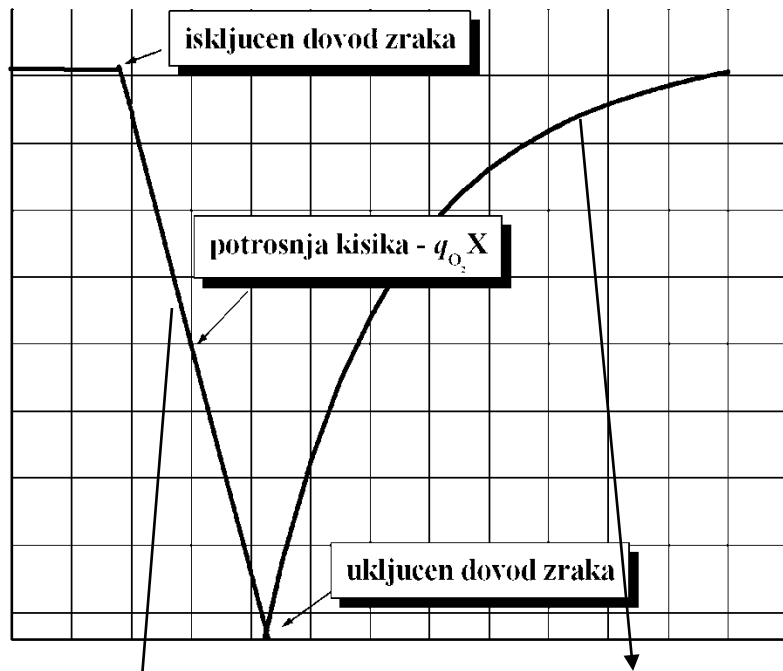
$$c_A = \frac{1}{k_L a} \left| \frac{\Delta c_A}{\Delta t} + q_o \rho_x \right| + c_A^*$$



- Kontinuirano-biološka metoda
- Tlačna metoda

Brzina potrošnje kisika u aerobnim mikrobiološkim sustavima – **dinamička metoda**

Metoda se temelji na praćenju koncentracije otopljenog kisika u **mikrobiološkom sustavu**, a mjerenje se provodi u dvije faze: U jednom trenutku se prekine dovod zraka, te kao posljedica toga dolazi do pada koncentracije kisika u otopini (mikroorganizmi ga troše). Kada koncentracija kisika padne na vrlo malu vrijednost, ponovno započinjemo aeriranje (uključen dovod zraka). Na osnovi eksperimentalnih podataka iz prvog perioda se dobije brzina potrošnje kisika mikroorganizama, a iz perioda nakon toga (ponovna aeracija) se računa $k_L a$ na temelju poznatih **izraza**.



time Iz ovog se perioda na temelju poznate brzine kojom mikroorganizmi troše kisik računa volumni koeficijent prijenosa kisika

Iz ovog se perioda računa brzina kojom mikroorganizmi troše kisik

$$c_{l,o_2} = \frac{1}{k_L a} \left[\frac{dc_{l,o_2}}{dt} + \mu \cdot c_X \right] + c_{l,o_2}^*$$

Brzina potrošnje kisika u aerobnim mikrobiološkim sustavima – dinamička metoda

Stacionarno stanje:

Q_{O_2} = apsorpcija = potrošnja kisika

$$k_l a' (c_l^* - c_l) = \frac{\mu \cdot X}{Y_{O_2}}$$

$$Y_{O_2} k_l a' (c_l^* - c_l) = X \cdot \mu_{\max} \frac{c_l}{K_{O_2} + c_l}$$

c_l puno manje od c_l^*

$$c_l = c_l^* \left[\frac{Y_{O_2} K_{O_2} k_l a' / X \mu_{\max}}{1 - Y_{O_2} c_l k_l a' / X \mu_{\max}} \right]$$

Brzina potrošnje kisika u aerobnim mikrobiološkim sustavima

Kisik se u stanici mikroorganizma upotrebljava za stanično održavanje (maintenance), oksidaciju disanjem, oksidaciju supstrata u metabolički krajnji produkt i kao reaktant u biotransformacijama.

Brzina potrošnje kisika u aerobnim mikrobiološkim sustavima

Topljivost kisika u vodenoj otopini pri tlaku 1 atm zraka i sobnoj temperaturi je reda veličine 10 ppm. Npr. aktivni kvasac pri aerobnim uvjetima troši kisik brzinom $0,3 \text{ g O}_2 / \text{h g}_{\text{suhe stanične mase}}$. Maksimum potrošnje kisika pri gustoći kvasca $10^9 \text{ stanica / mL}$ je procijenjena uz pretpostavku da stanice imaju volumen 10^{-10} mL od čega je 80 % voda. Uz ove je pretpostavke apsolutna potrošnja kisika:

$$\frac{0,3 \text{ g O}_2}{\text{g}_{\text{suhetvari}} \times \text{h}} \left(10^9 \frac{\text{stanica}}{\text{mL}} \right) (10^{-10} \text{ mL}) \left(1 \frac{\text{g}_{\text{stanica}}}{\text{cm}^3} \right) \left(0,2 \frac{\text{g}_{\text{suhistanica}}}{\text{g}_{\text{stanica}}} \right)$$
$$= 6 \times 10^{-3} \text{ g / (mL} \times \text{h)} = 6 \text{ g / (L} \times \text{h)}$$

Aktivne stanice aerobnog mikroorganizma troše kisik brzinom koja je 750 puta veća od vrijednosti zasićenja O_2 po satu.

Brzina potrošnje kisika u aerobnim mikrobiološkim sustavima

Topljivost kisika O₂ pri različitim tlakovima i temperaturama

Table 6.2-6. Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures—Continued

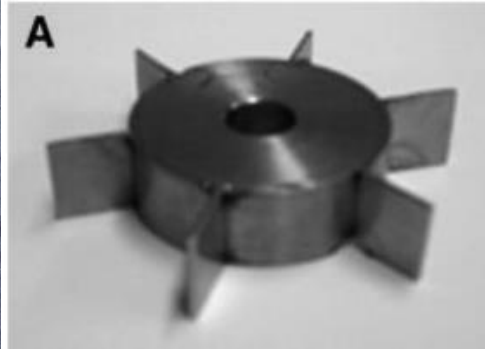
Temp °C	Atmospheric pressure, in millimeters of mercury																			
	795	790	785	780	775	770	765	760	755	750	745	740	735	730	725	720	715	710	705	700
15.0	10.5	10.5	10.4	10.3	10.3	10.2	10.1	10.1	10.0	9.9	9.9	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.4	9.3	9.3
15.5	10.4	10.4	10.3	10.2	10.2	10.1	10.0	10.0	9.9	9.8	9.8	9.7	9.6	9.6	9.5	9.4	9.4	9.3	9.2	9.2
16.0	10.3	10.2	10.2	10.1	10.0	10.0	9.9	9.8	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.4	9.3	9.3	9.2	9.1	9.1
16.5	10.2	10.1	10.1	10.0	9.9	9.9	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.4	9.4	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0
17.0	10.1	10.0	10.0	9.9	9.8	9.8	9.7	9.6	9.6	9.5	9.4	9.4	9.3	9.3	9.2	9.1	9.1	9.0	8.9	8.9
17.5	10.0	9.9	9.9	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.4	9.3	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0	8.9	8.8	8.8
18.0	9.9	9.8	9.8	9.7	9.6	9.6	9.5	9.4	9.4	9.3	9.3	9.2	9.1	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.7	8.7
18.5	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.4	9.3	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7	8.7	8.6
19.0	9.7	9.6	9.6	9.5	9.4	9.4	9.3	9.3	9.2	9.1	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5
19.5	9.6	9.5	9.5	9.4	9.3	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0	8.9	8.9	8.8	8.7	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4
20.0	9.5	9.4	9.4	9.3	9.3	9.2	9.1	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.3
20.5	9.4	9.3	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0	8.9	8.9	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3
21.0	9.3	9.2	9.2	9.1	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.2	8.2
21.5	9.2	9.2	9.1	9.0	9.0	8.9	8.9	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1
22.0	9.1	9.1	9.0	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0
22.5	9.0	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0	7.9
23.0	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9
23.5	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.8	7.8
24.0	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7
24.5	8.7	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.7	7.7	7.6
25.0	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6
25.5	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5
26.0	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4
26.5	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4
27.0	8.3	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.3	7.3
27.5	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4	7.3	7.3	7.2
28.0	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2
28.5	8.1	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4	7.3	7.3	7.2	7.1	7.1
29.0	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.1	7.0
29.5	8.0	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.1	7.0	7.0

Inženjerski zahtjevi pri projektiranju bioreaktora

1. Snabdjevanje biomase kisikom – aeracija
– prijenos tvari plin-kapljevina-krutina
2. Miješanje i strujanje reakcijske smjese
3. Odvođenje topline

Miješanje u bioreaktorima

Miješanje u bioreaktorima može biti izvedeno na različite načine. Odabir načina miješanja ovisi o sustavu koji proučavamo (kemijska reakcija, biokemijska reakcija, mikrobiološki uzgoj, dolazi li do promjene viskoznosti reakcijskog medija itd.)



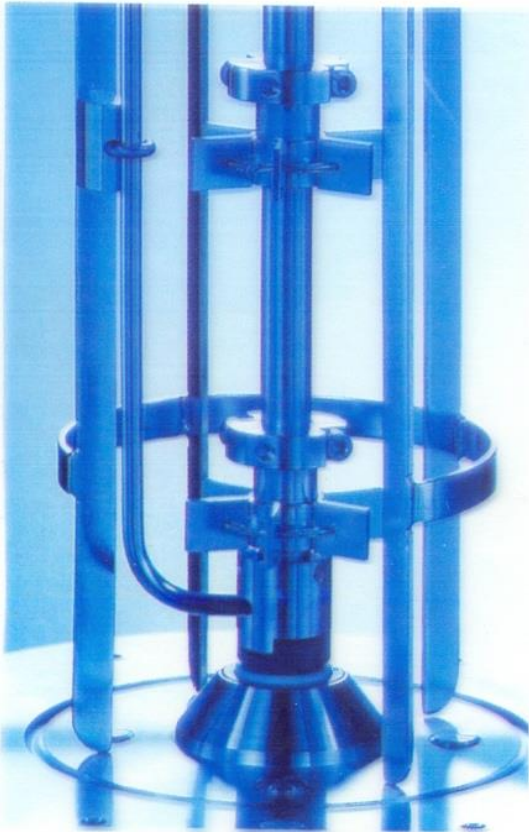
Miješalo može biti različitih izvedbi i dimenzija kao što je prikazano na slikama.



Miješanje u bioreaktorima

Na slici su prikazane različite izvedbe miješanja u bioreaktorima za uzgoj bakterija, stanica sisavaca i biljnih stanica.

Bacteria Fermenter



Mammalian Cell Fermenter

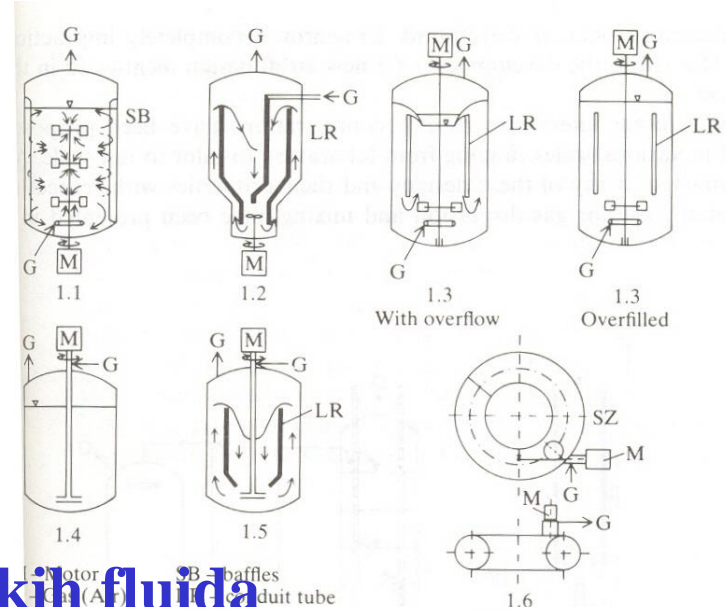


Plant Cell Fermenter

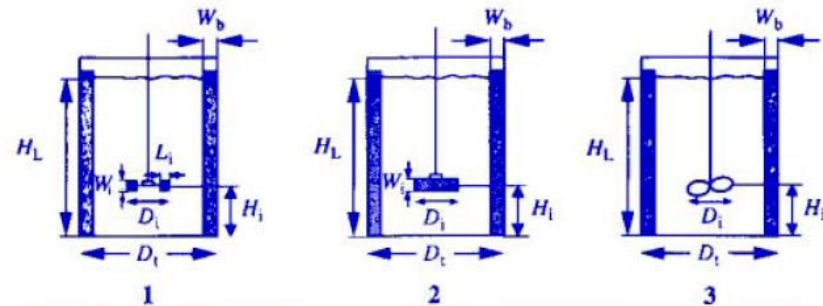
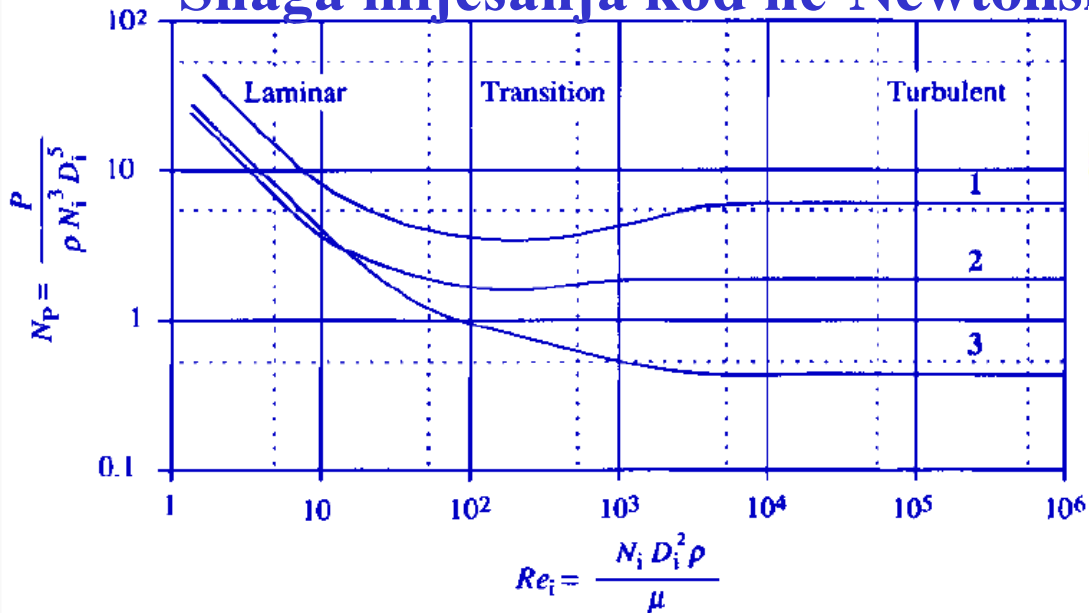


Miješanje u bioreaktorima

Miješanje pomoću mehaničkog miješala i dovođenja energije-
mikroorganizmi sa čvrstom
staničnom stjenkom



Snaga miješanja kod ne-Newtonskih fluida

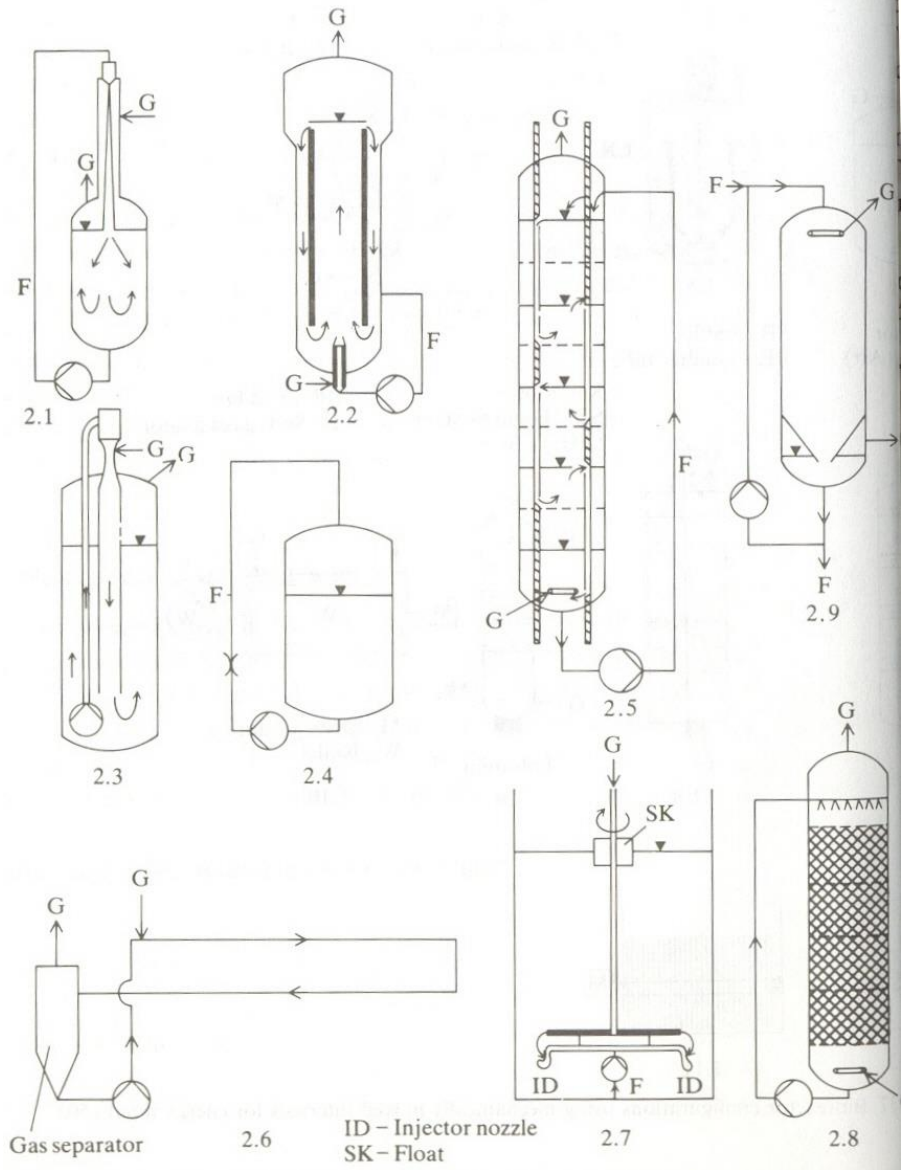
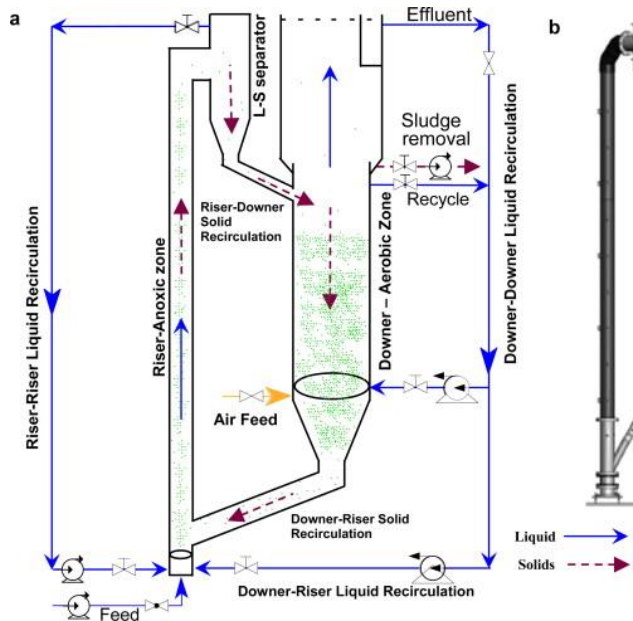
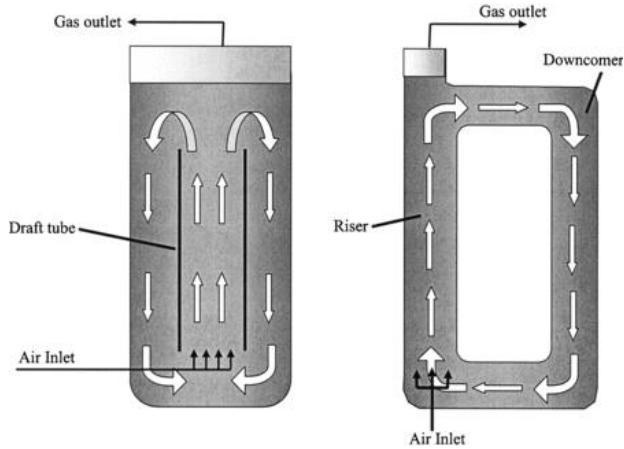


Impeller	D_i / D_t	H_L / D_i	H_i / D_i	Baffles	
				W_b / D_i	Number
1. Rushton turbine $W_i / D_i = 0.2, L_i / D_i = 0.25$	3	3	1	0.1	4
2. Paddle $W_i / D_i = 0.25$	3	3	1	0.1	4
3. Marine propeller Pitch = D_i	3	3	1	0.1	4

1 → Rushton turbine; 2 → Paddle; 3 → Marine propeller

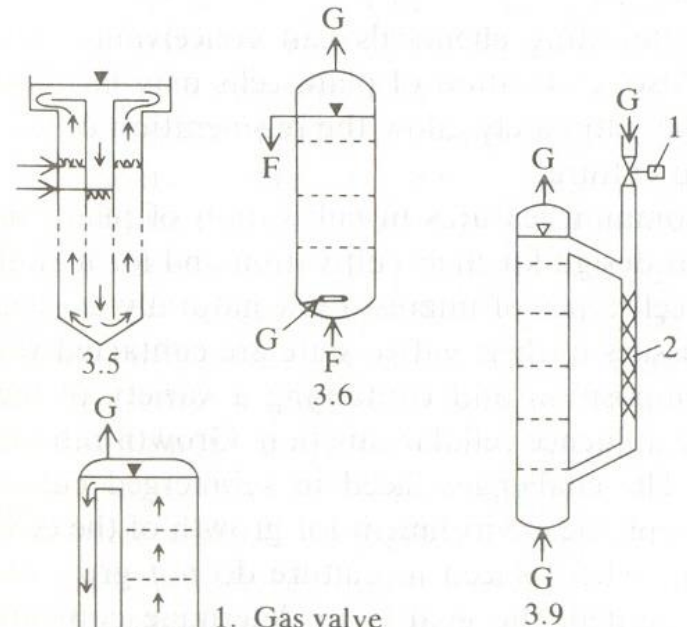
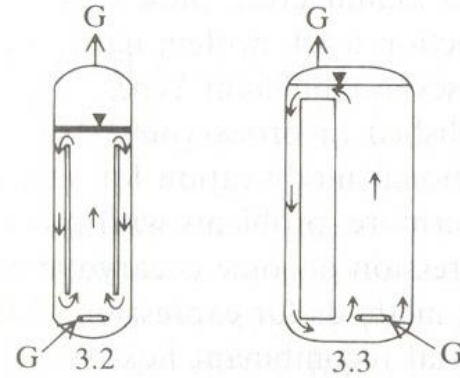
Miješanje u bioreaktorima

Miješanje pomoću cirkulacije medija i vanjske pumpe



Miješanje u bioreaktorima

Miješanje pomoću zraka –
kompresija



1. Gas valve
2. Static mixer
Valve 1 is periodically opened and closed

3.8

Miješanje u bioreaktorima



ALF autoclavable laboratory fermenter
A proven idea brought up to date

Miješanje u bioreaktorima

Bacteria Fermenter



Mammalian Cell Fermenter



Plant Cell Fermenter



Razbijači vrtložnog gibanja