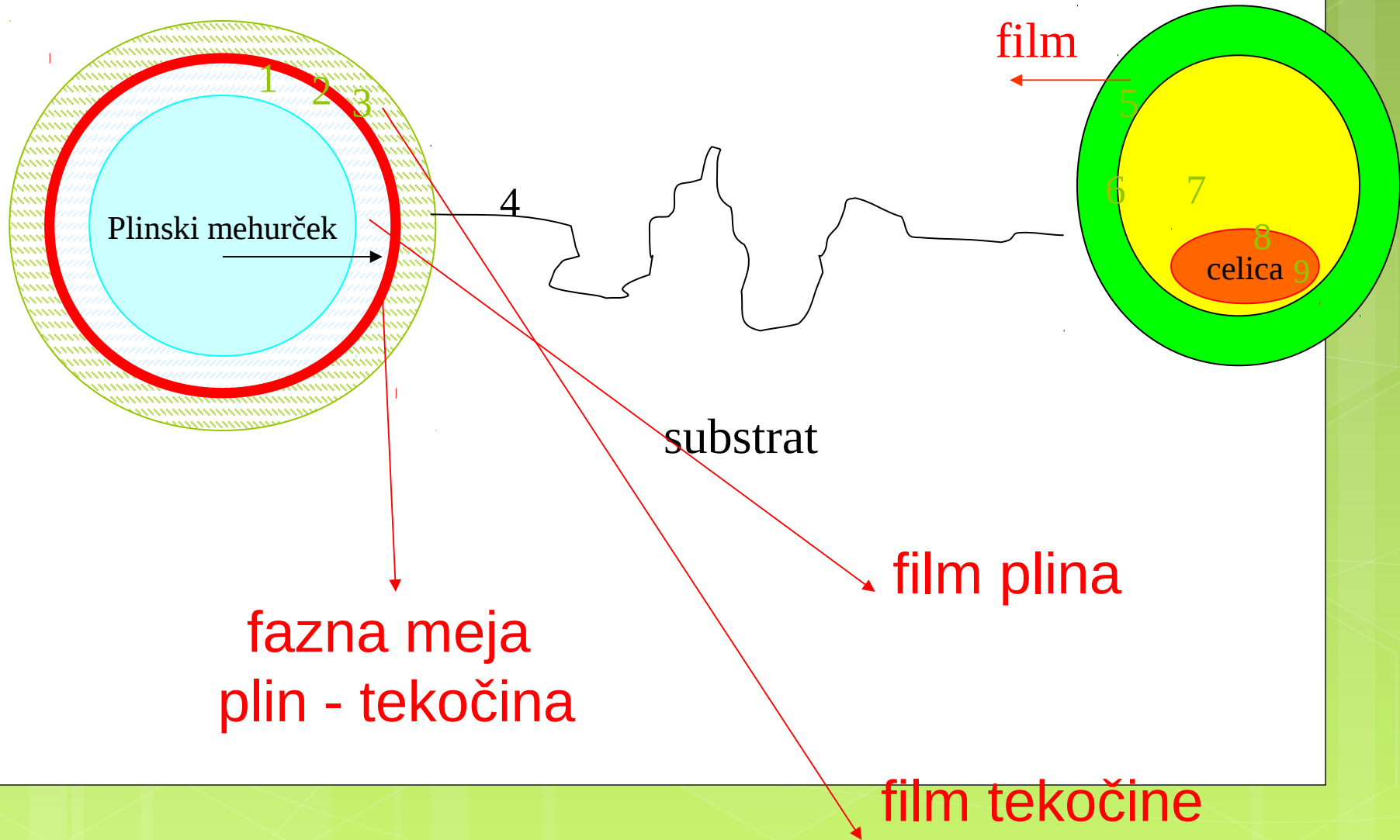


Prenos snovi v bioreaktorjih

Vnos kisika

PRENOS O_2 V SISTEMU PLIN - KAPLJEVINA

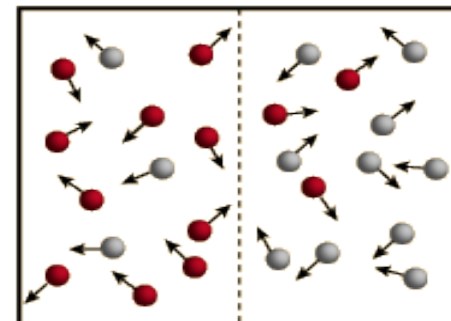
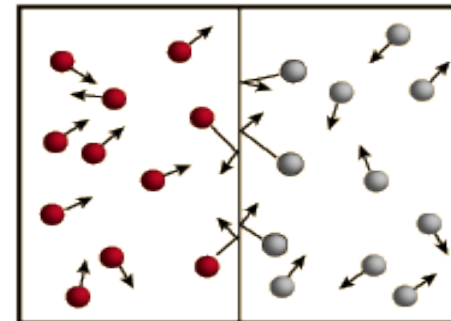


PRENOS SNOVI

- Snovni prenos – premik materialnih delcev
 - z **difuzijo** (je posledica gibanja molekul zaradi neenakomerne porazdelitve)

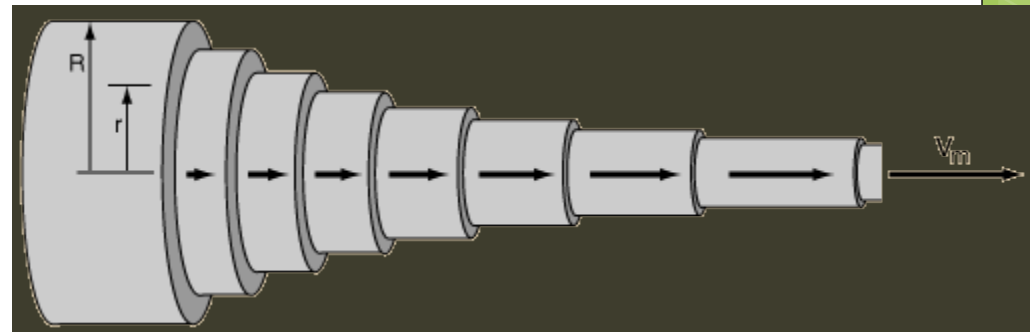
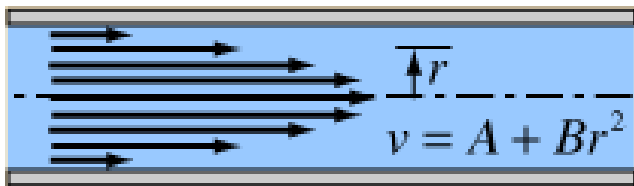
Fickov zakon: $\vec{J}_A = -D_{AB} \nabla C_A$; $\vec{J}_{A,z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz}$

- s **konvekcijo** (je vezana na turbulentno gibanje tekočine ob fazni meji z drugo tekočino ali trdno snovjo).

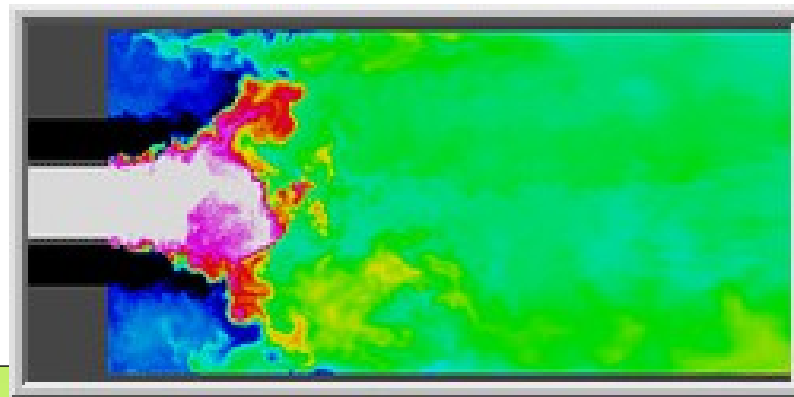


TOK TEKOČINE V CEVI

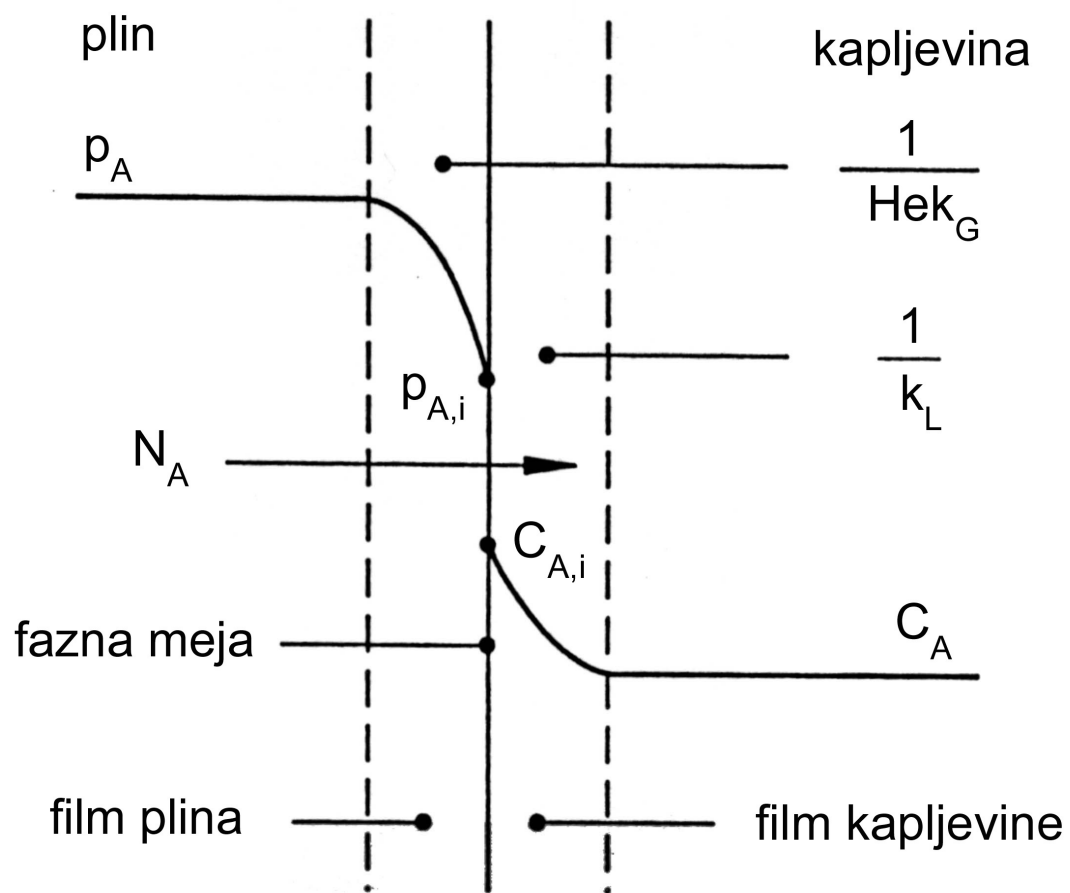
- Prenos snovi je odvisen od tokovne oblike



- turbulentni tok



KONVEKTIVNI PRENOS SNOVI



KONVEKTIVNI PRENOS SNOVI

- Henryjev zakon: $p_A = H e \cdot C_A^*$
- Ravnotežje na fazni meji: $p_{A,i} = H e C_{A,i}$

$$N_A = k_G (p_A - p_{A,i}) = k_L (C_{A,i} - C_A)$$

$$N_A = \left[\frac{1}{k_L} + \frac{1}{H e k_G} \right]^{-1} (C_A^* - C_A) = K_L (C_A^* - C_A)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{H e k_G}$$

SNOVNI TOK

- brez porabe kisika:

$$\dot{w}_A = k_L A (C_A^* - C_A) = k_L a (C_A^* - C_A) V$$

$k_L a$ [s^{-1}] : volumenski koeficient snovnega prestopa

- s porabo kisika:

$$V \frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C) V + r_{O_2} V$$

SNOVNI TOK

- hitrost porabe kisika

$$r_{O_2} = -r_x Y_{O/X} = -\mu X Y_{O/X} = -q_{O_2} X$$

$$r_{O_2} = -q_{O_2} X = -\frac{\mu_g \cdot X}{Y_{x/O_2}} \quad q_{O_2} X = \text{OUR}$$

- hitrost snovnega toka kisika na enoto V

$$\text{OTR} = k_L a (C^* - C)$$

SNOVNA BILANCA

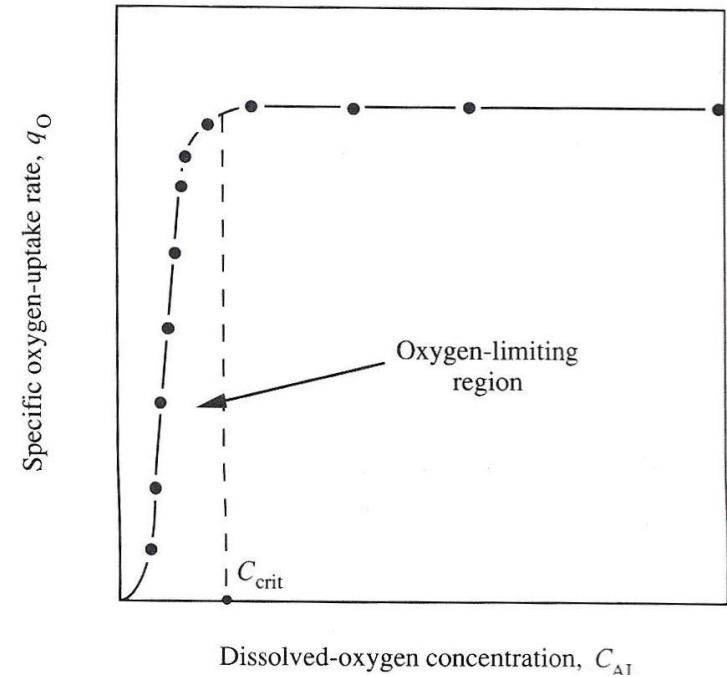
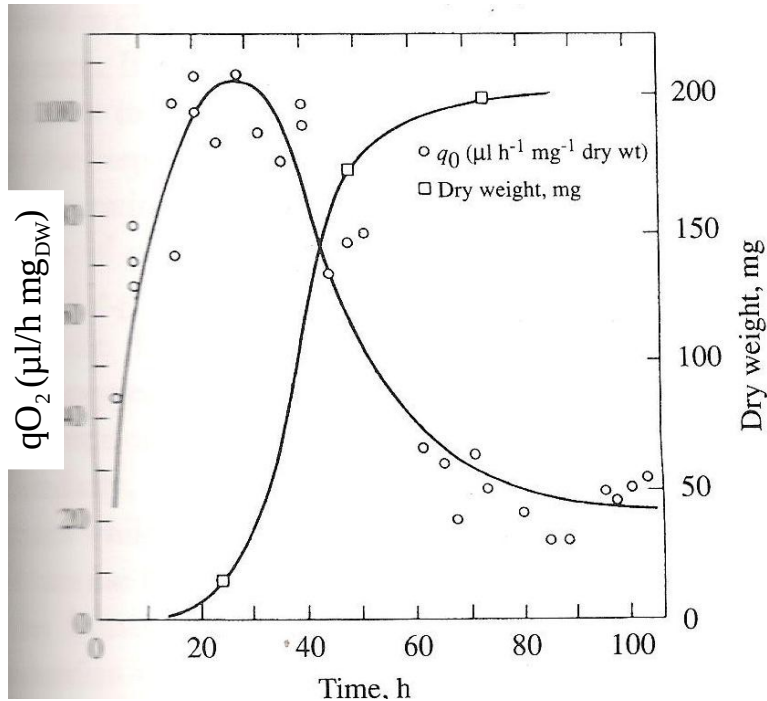
- za zrak:

$$\Phi_g (C_{g,v} - C_{g,iz}) = k_L a \cdot (C^* - C) V$$

- za kapljevino:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C) + r_{O_2}$$

Spreminjanje q_{O_2} med bioprosesom



$$V \frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C) V + r_{O_2} V$$

$$r_{O_2} = -q_{O_2} X = -\frac{\mu_g \cdot X}{Y_{x/O_2}}$$

Če je transport kisika limitni dejavnik rasti, je hitrost porabe kisika enaka hitrosti prenosa v kapljevino:

$$\frac{\mu_g \cdot X}{Y_{x/O_2}} = k_L a (C^* - C) \quad \frac{dX}{dt} = Y_{x/O_2} k_L a (C^* - C)$$

Specifična poraba kisika q_{O_2} pri različnih organizmih

Organism	q_{O_2} (mmol O ₂ /g dw-h)
Bacteria	
<i>E. coli</i>	10–12
<i>Azotobacter</i> sp.	30–90
<i>Streptomyces</i> sp.	2–4
Yeast	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	8
Molds	
<i>Penicillium</i> sp.	3–4
<i>Aspergillus niger</i>	ca. 3
Plant cells	
<i>Acer pseudoplatanus</i> (sycamore)	0.2
<i>Saccharum</i> (sugar cane)	1–3
Animal cells	
HeLa	$0.4 \frac{\text{mmol O}_2/\text{1-h}}{10^6 \text{ cells/ml}}$
Diploid embryo WI-38	$0.15 \frac{\text{mmol O}_2/\text{1-h}}{10^6 \text{ cells/ml}}$

Poraba kisika v industrijskih bioreaktorjih

bioproces	$w_{O_2/V}$ [kg O ₂ /m ³ h]	$k_L a$ [h ⁻¹]	E_f [kg O ₂ /kW h]
Proizvodnja kvasa	do 10	do 700	1,5
Proizvodnja antibiotikov	0,6 - 2,0	70 - 250	3
Biološka čistilna naprava	0,05 – 0,15	10 - 20	2 - 3

E_f ... učinkovitost aeracijske naprave

Ravnotežna topnost kisika c^*

- Odvisna od:
 - Pritiska, sestave plina
 - Temperature, raztopljenih snovi

Concentration (M)	Oxygen solubility (kg m^{-3})		
	HCl	$\frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4$	NaCl
0	4.14×10^{-2}	4.14×10^{-2}	4.14×10^{-2}
0.5	3.87×10^{-2}	3.77×10^{-2}	3.43×10^{-2}
1.0	3.75×10^{-2}	3.60×10^{-2}	2.91×10^{-2}
2.0	3.50×10^{-2}	3.28×10^{-2}	2.07×10^{-2}

Table 9.4 Solubility of oxygen in aqueous solutions of sugars under 1 atm oxygen pressure

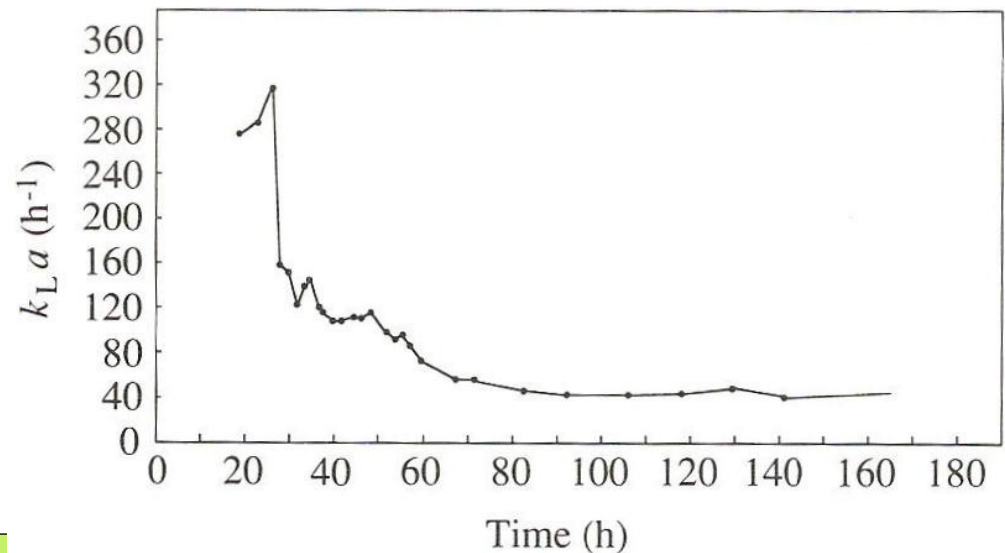
(Calculated from data in International Critical Tables, 1928, vol. III, p. 272. McGraw-Hill, New York)

Sugar	Concentration ($\text{gmol per kg H}_2\text{O}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Oxygen solubility (kg m^{-3})
Glucose	0	20	4.50×10^{-2}
	0.7	20	3.81×10^{-2}
	1.5	20	3.18×10^{-2}
	3.0	20	2.54×10^{-2}
Sucrose	0	15	4.95×10^{-2}
	0.4	15	4.25×10^{-2}
	0.9	15	3.47×10^{-2}
	1.2	15	3.08×10^{-2}

$k_L a$ odvisen od:

- velikosti in števila mehurčkov
- vsebnosti elektrolitov
- reoloških lastnosti brozge
- koalescentnosti sistema
- tokovnega režima
 - način uvajanja zraka (distributor plinov)
 - pretok zraka

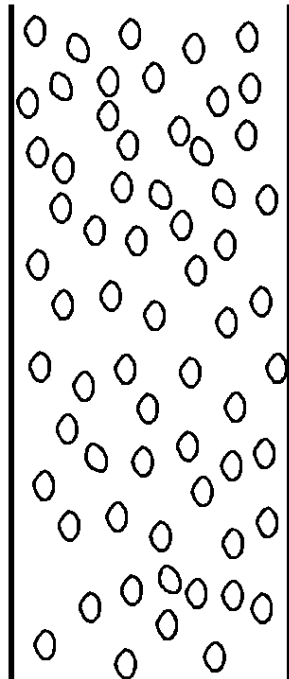
Proizvodnja
antibiotikov s
streptomicetami (zelo
viskozna brozga)



STOLPNI REAKTOR

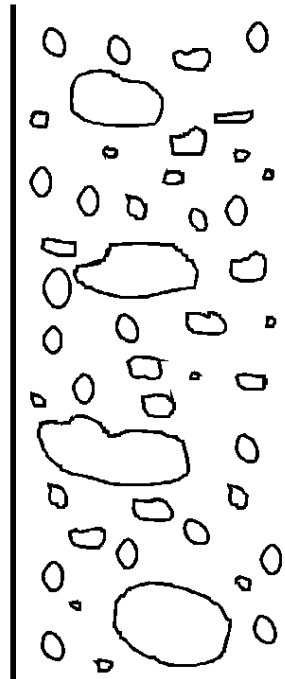
HOMOGENI REŽIM

mehurčkasti tok

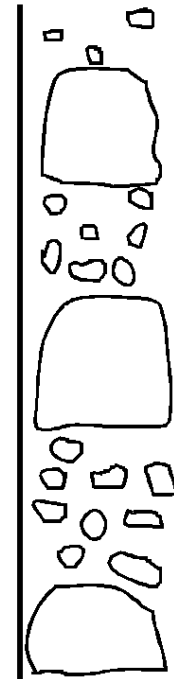


HETEROGENI REŽIM

mešani tok



mehurjasti tok



tokovni režimi v stolpnem reaktorju

Napoved $k_L a$ za stolpni reaktor

- newtonske tekočine:

$$k_L a = b \cdot v_G^n$$



volumenski pretok zraka na enoto preseka reaktorja

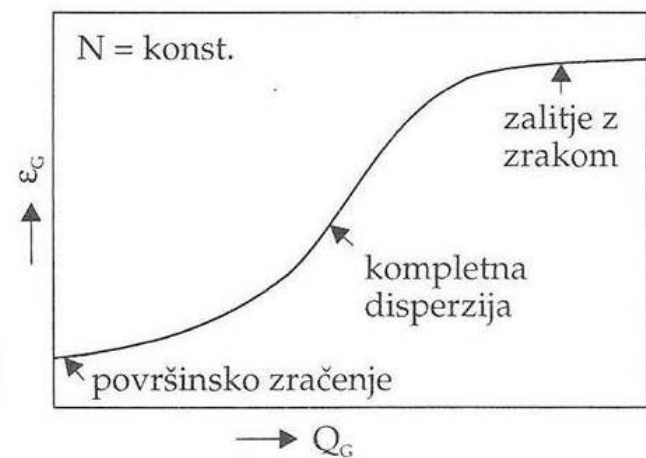
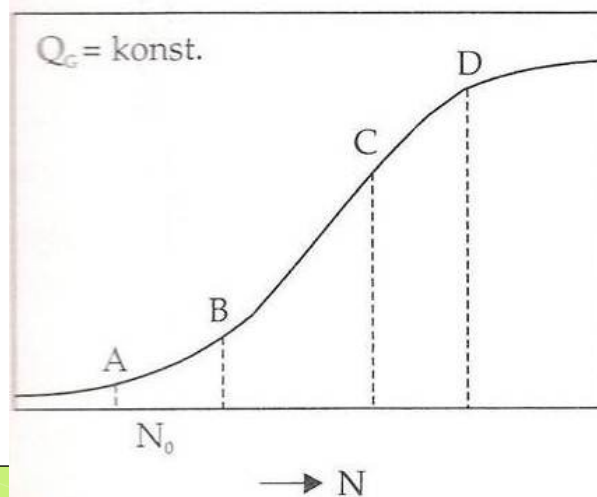
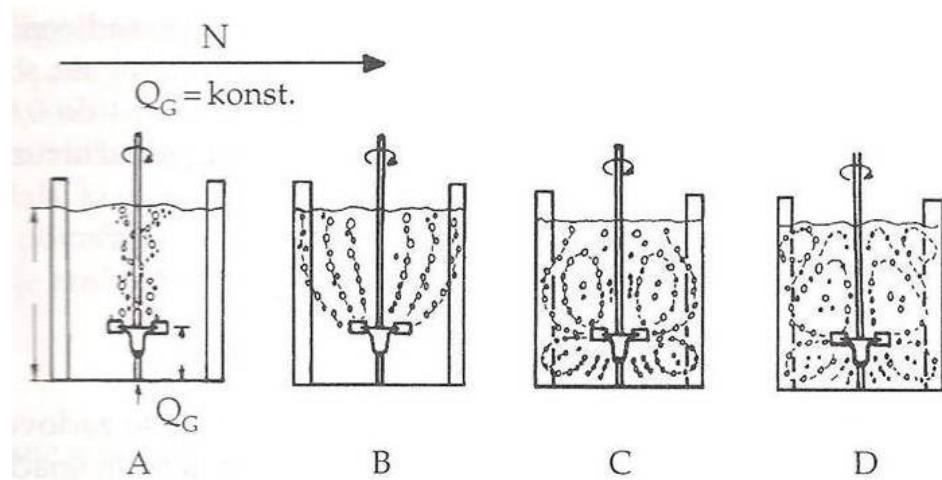
eksperimentalno
določena
koeficienta

- nenewtonske tekočine:

$$k_L a = 0,003 \cdot v_G^{0,59} \cdot \eta_{ef}^{-0,84} \quad (\text{CMC})$$

Zračenje v mešalnem reaktorju

N ... vrtilna hitrost mešala [s^{-1}]
 Q_G ... pretok zraka [m^3/s]
 ϵ_G ... delež zraka



Korelacije za napoved $k_L a$ v mešalnih bioreaktorjih

- Nizkoviskozni sistemi (voda, vodne raztopine)

$$a = 1,44 \left[\frac{(P/V)^{0,4} \rho^{0,2}}{\sigma^{0,6}} \right] \left[\frac{v_G}{v_t} \right]^{0,5}$$

$$\frac{k_L d_p}{D_L} = 0,31 \left[\frac{d_p^3 (\rho - \rho_G) g \rho}{\eta^2} \right]^{1/3} \left[\frac{\eta}{\rho D_L} \right]^{1/3}$$

$$\frac{k_L d_p}{D_L} = 0,42 \left[\frac{d_p^3 (\rho - \rho_G) g \rho}{\eta^2} \right]^{1/3} \left[\frac{\eta}{\rho D_L} \right]^{1/2}$$

$$d_p = 4,15 \left[\frac{\sigma^{0,6}}{(P/V)^{0,4} \rho_L^{0,2}} \right] \varepsilon^{1/2} + 0,0009$$

Pri sobni T, konstantne snovne lastnosti:

$$k_L a = C_3 \left(\frac{P}{V} \right)^{a_1} v_G^{a_2}$$

P ... vnos moči z mešalom [W]

V ... prostornina disperzije [m³]

v_g ... povprečna linearna hitrost plina [m/s]

v_t ... terminalna hitrost mehurčka [m/s]

d_p ... premer mehurčka [m]

D_L ... difuzivnost O₂ v kapljevini [m²/s]

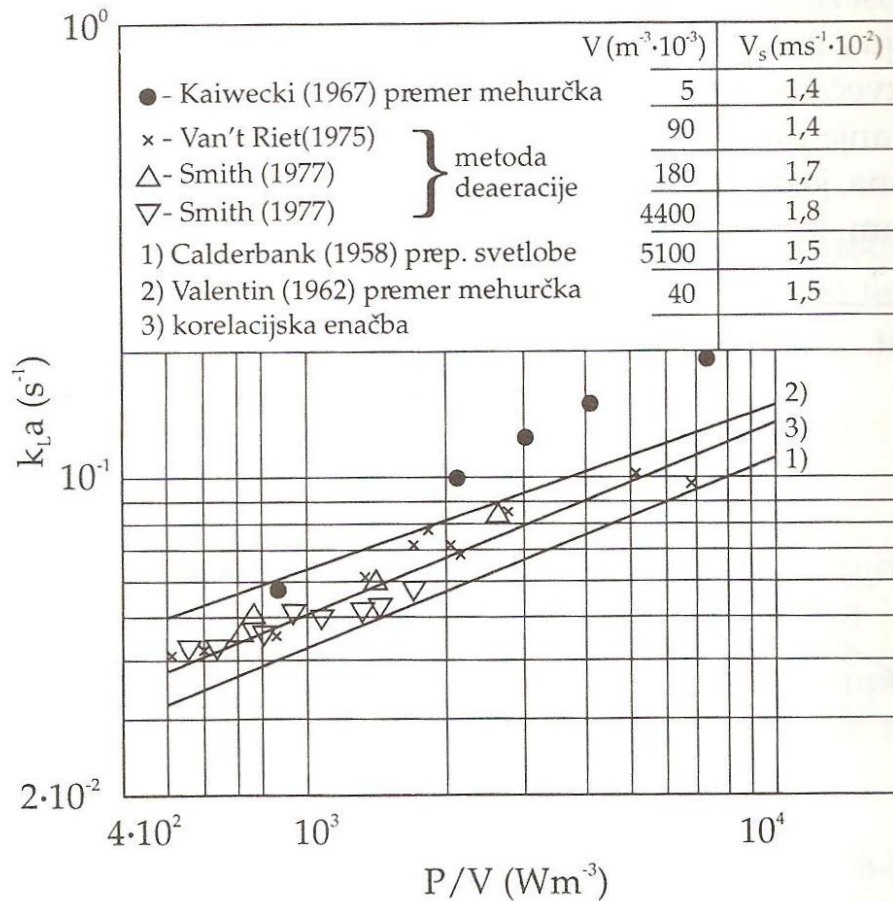
ε ... delež plina v disperziji

σ ... površinska napetost [N/m]

ρ, ρ_L ... gostota kapljevine [kg/m³]

ρ_G ... gostota plina [kg/m³]

Korelacije za napoved $k_L a$ v mešalnih bioreaktorjih



Nekoalescentni, nevizkozni sistemi:

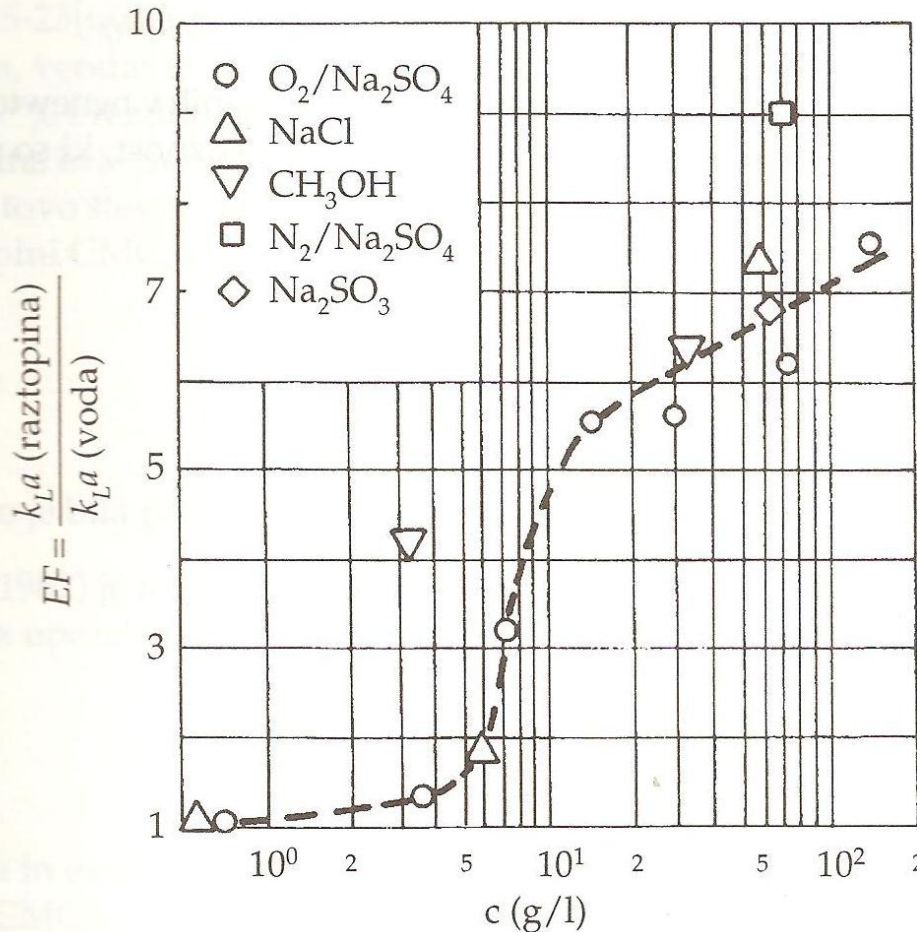
$$k_L a = 0,002 \left(\frac{P}{V} \right)^{0,7} v_G^{0,2}$$

Koalescentni sistemi:

$$k_L a = 0,0026 \left(\frac{P}{V} \right)^{0,4} v_G^{0,5}$$

Slika 4.5-7: Korelacija $k_L a$ v koalescentnih sistemih (Van't Riet, 1979)

Vpliv elektrolitov na $k_L a$



Dodatek elektrolitov pogosto vodi v tvorbo manjših mehurčkov, ki ne koalescirajo

⇒ višji $k_L a$

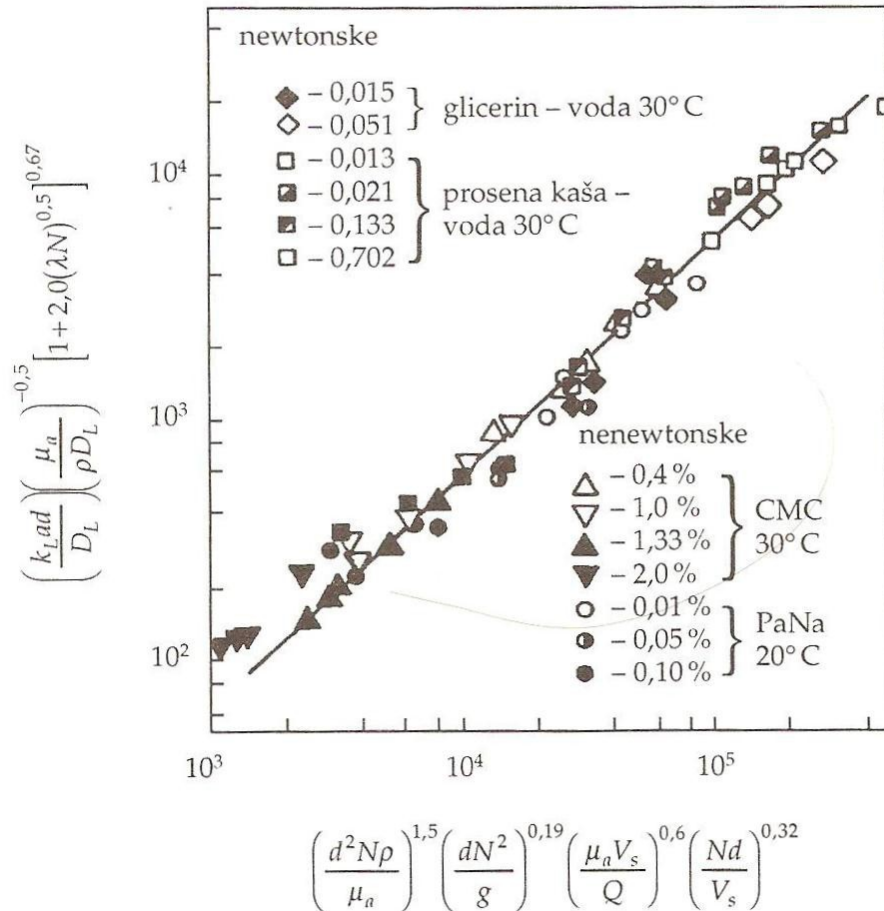
Slika 4.5-8: Vpliv elektrolitov na $k_L a$ (Zlokarnik, 1978)

$$k_{La} \frac{d^2}{D_L} = 0,060 \left(\frac{d^2 N \rho}{\eta} \right)^{1,5} \left(\frac{d N^2}{g} \right)^{0,19} \left(\frac{\eta}{\rho D_L} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta v_G}{\sigma} \right)^{0,6} \left(\frac{N d}{v_G} \right)^{0,32}$$

Korelacije za napoved k_{La} v mešalnih bioreaktorjih

Viskoviskozni sistemi

$$\eta_{ef} = K(11,5 N)^{n-1}$$

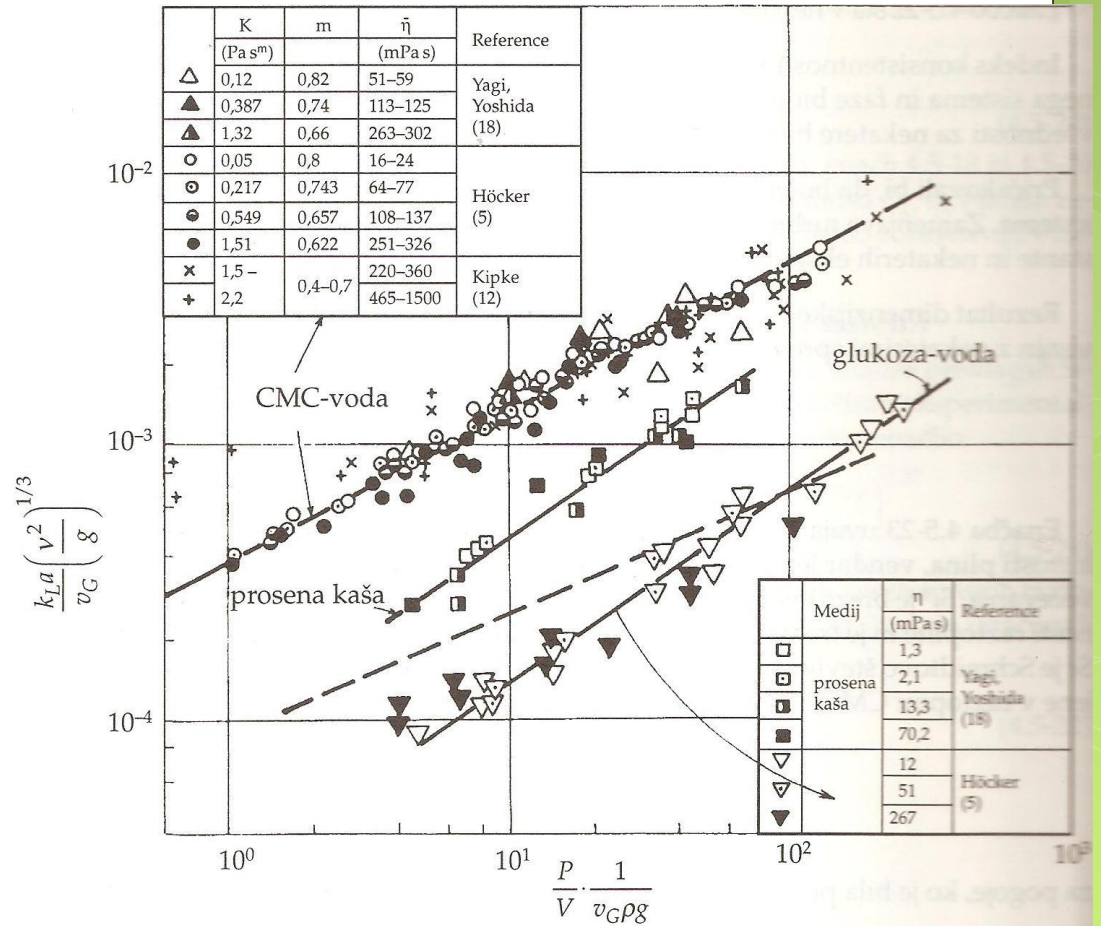


Slika 4.5-9: Korelacija k_{La} za viskozne sisteme (Yagi in Yoshida, 1979)

Korelacije za napoved $k_L a$ v mešalnih bioreaktorjih

Viskoviskozi sistemi

$$\frac{k_L a}{v_G} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = A \left[\frac{P}{V} + \frac{1}{v_G \rho g} \right]^a$$



Slika 4.5-10: Korelacija $k_L a$ za viskozne sisteme (Henzler, 1982)

Eksperimentalno določanje $k_L a$

- Stacionarna metoda

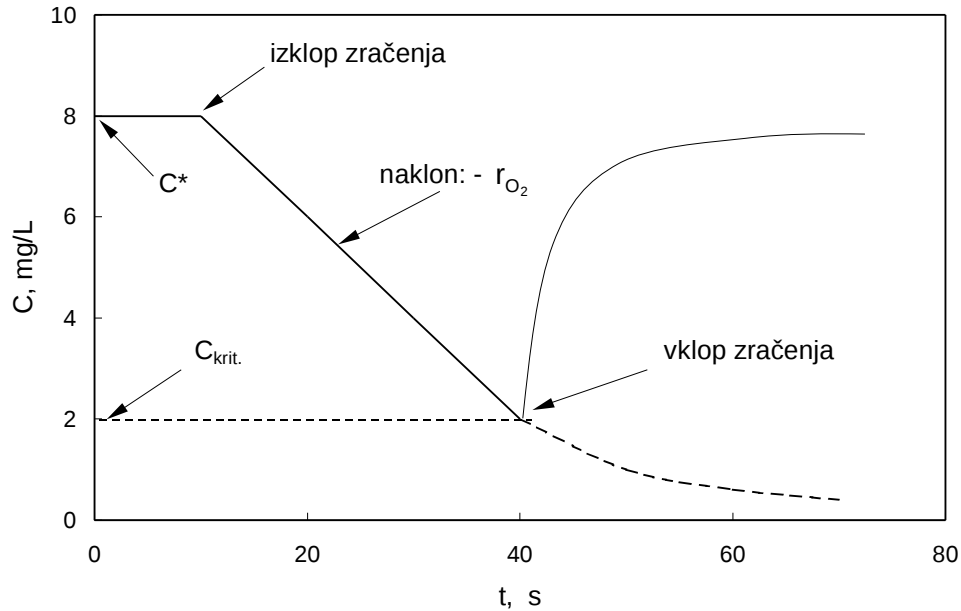
konstantna konc. kisika, iz enačbe:

$$\Phi g (C_{g,v} - C_{g,i,z}) = k_L a \cdot (C^* - C) V$$

- Dinamična metoda

Konc. kisika se spreminja

Dinamična metoda določanja $k_L a$

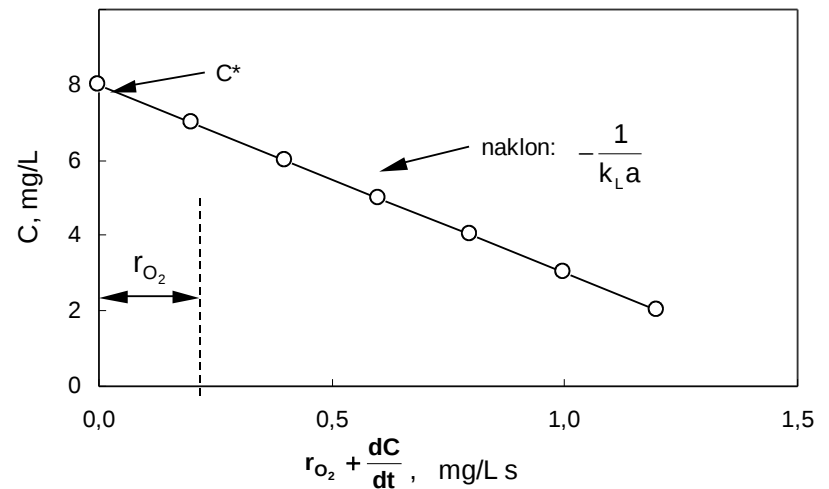


$$C = C^* - \frac{1}{k_L a} \left[q_{O_2} X + \frac{dC}{dt} \right]$$

$$1. C = C^*$$

$$2. k_L a = 0, \quad \frac{dC}{dt} = -q_{O_2} X$$

$$3. \frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C) - q_{O_2} X$$



Določanje $k_L a$ z dinamično metodo v sistemu voda-zrak brez mikrobov

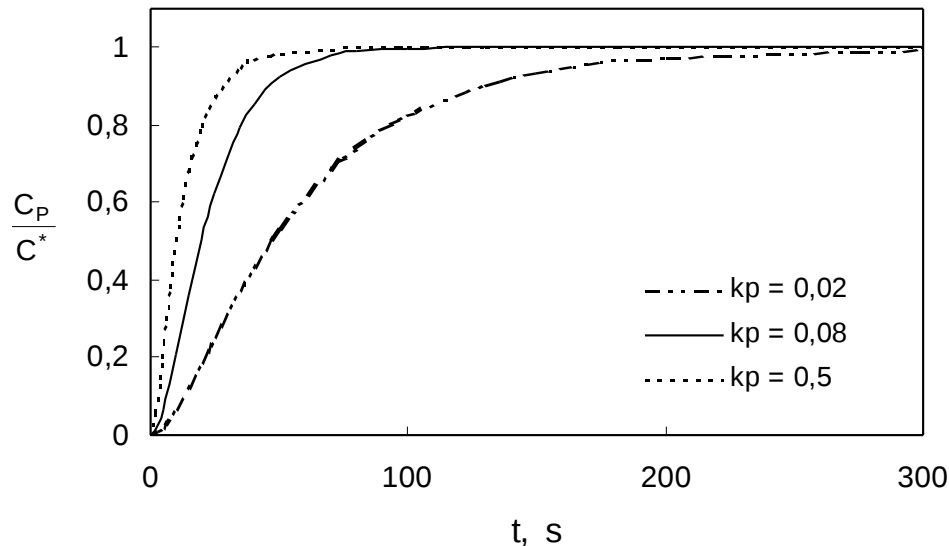
- popolno pomešanje, z. p.: $t = 0, C = 0$:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C)$$

- odziv elektrode 1. reda, z.p.: $t = 0, C_p = 0$:

$$\frac{dC_p}{dt} = k_p (C - C_p)$$

Določanje $k_L a$ z dinamično metodo v sistemu voda-zrak brez mikrobov



rešitev sistema enačb z navedenimi zač. pogoji:

$$\frac{C_P}{C^*} = 1 + \left(\frac{k_L a}{k_P - k_L a} \right) e^{-k_P t} - \left(\frac{k_P}{k_P - k_L a} \right) e^{-k_L a t}$$

Sproščanje toplote pri aerobnih procesih

- 40-50 % energije se pretvori v ATP, ostalo v toploto

$$Q_g = V_L \cdot \mu \cdot X \cdot \frac{1}{Y_H}$$

$\frac{1}{Y_H}$...metabolna toplota na enoto celične mase [kJ/g_{celic}]

Sproščena toplota sorazmerna porabi kisika:

$$Q_g \cong 0,12 Q_{O_2}$$

← [kcal/h] [mmol O₂/h]

Domača naloga

V stacionarni fazi aerobnega šaržnega procesa pridobivanja alginata z bakterijo *Azotobacter vinelandii* je ocenjena vrednost $k_L a$ $0,17 \text{ s}^{-1}$. Topnost kisika, ki ga uvajamo z zrakom, pri obravnavanih pogojih znaša približno 8 mg/L . Z dinamično metodo smo določili specifično hitrost porabe kisika $0,4 \text{ h}^{-1}$.

- a) Koliko znaša največja koncentracija dobljene biomase v g/L , ki bi jo omogočal prenos snovi v tem sistemu (predpostavite največji koncentracijski gradient)?
- b) Če predpostavimo enako hitrost porabe kisika in $k_L a$ ocenite, kolikšna bi bila ta koncentracija (glejte a) pri vpihovanju čistega kisika?
- c) Ali se med obravnavanim procesom (v vseh fazah šaržnega procesa), ki ga vodimo pri konstantnih pogojih mešanja in prezračevanja, OTR (hitrost vnosa kisika) spreminja? Utemeljite odgovor!