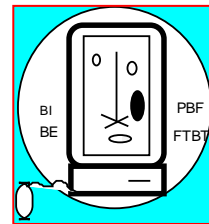


Zavod za biokemijsko inženjerstvo

Laboratorij za biokemijsko inženjerstvo, industrijsku
mikrobiologiju, tehnologiju piva i slada



Prehrambeno-biotehnološki fakultet

Diplomski studij: ***Bioproceno inženjerstvo***

Kolegij: ***Biokemijsko inženjerstvo i bioprocena tehnika***

(privremeni, neregizirani, neizdvojeni nastavni materijal za pripremu dijela pismenog ispita)

X REAKTORI SA STALNIM KRUŽNIM TOKOM

Kontrolu računskog dijela izvršili:

Dr. Mladen Pavlečić, dipl.ing

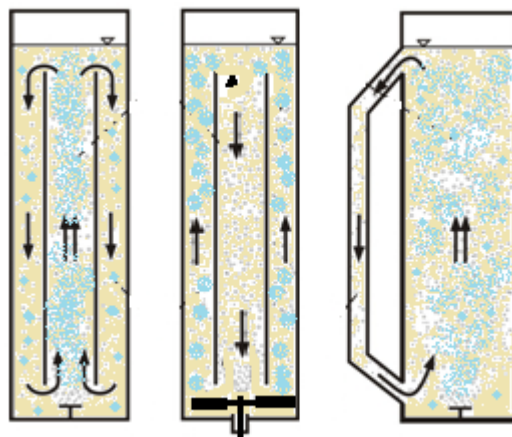
Mario Novak, dipl. ing.

Dr. Antonija Trontel, dipl.ing

X-1. OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

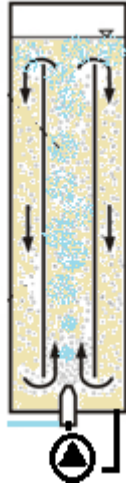
Reaktori sa stalnim kružnim tokom: (njem.: *die Schlaufenreaktoren*; engl.: *loop-reactors*).

Reaktori za uzgoj mikroorganizama, provedbu biotransformacija i obradu otpadnih voda u koji zbog svoje konstrukcije imaju minimalno jedan u prostoru točno usmjeren „kružni“ tok podloge. Obzirom na konstrukciju, dijelimo ih na reaktore s vanjskim i reaktore s unutrašnjim kružnim tokom. Obzirom na silu kojom postizemo kružni tok podloge, reaktore dijelimo na reaktore sa zračnom pumpom (engl.: *air-lift loop reactors*), reaktore s dvofaznom mlaznicom (*jet loop reactors*), reaktore s propelerskim miješalima i reaktore s recirkulacijskom pumpom. Reaktori s mlaznicom uvijek imaju i recirkulacijsku pumpu. Dio reaktora s recirkulacijskom pumpom radi na principu padajućeg mlaza (s vrha reaktora na površinu disperzije) –kinetička energija mlaza je pokretačka energija za miješanje (njem.: *die Tiefstrahlreaktoren*, engl.: *deep-jet reactors*). Većinom se izvode u obliku zatvorene, stojeće, cilindrične posude s ugrađenom ili s vanjskom cirkulacijskom cijevi te raspršivačem zraka (barboterom) ili sapnicom pri dnu posude. Odnos visine reaktora i promjera reaktora (vitkost) se uobičajeno kreće do 10:1, a u posebnim vrlo rijetkim slučajevima konstruirani su reaktori do odnosa 100:1.



Sl. X-1.

Reaktori s unutrašnjim kružnim tokom (lijevo i sredina) i vanjskim kružnim tokom (desno). Svi prikazani su sa zračnom pumpom.



Sl. X-2. *Reaktor s dvofaznom sapnicom. Kao sapnica na dnu reaktora mogu biti ejektor, injektor, Ventouri-jeve cijevi, prstenaste sapnice.*

Barbotiranje: Za barbotiranje kod ovih reaktora vrijede iste definicije i pojmovi kao i kod barbotirajućih kolona.

Kružni (prostorno usmjereni) tok podloge: (sinonim: *cirkulacijski tok*) Gibanje podloge u zatvorenoj krivulji po prostoru reaktora. Započinje u sekciji reaktora u kojoj se nalazi aerator, zbog razlike u gustoći dolazi do izdizanja mjehurića koji zbog trenja sa sobom „povlače“ podlogu. Podloga se uzdiže do vrha reaktora gdje u sekciji za otplinjavanje mjehurići napuštaju podlogu, a podloga mijenja smjer kretanja. U povratnom toku podloga se vraća u sekciju za aeriranje. Između aeriranog i neaeriranog dijela podloge nastaje razlika hidrostatskog tlaka (Δp) zbog razlike u gustoći disperzije (koja je posljedica različitog udjela zraka!). Ta razlika tlaka je pokretačka sila za kružno (cirkulacijsko) kretanje podloge. Tlakovi na dnu aerirane i neaerirane sekcije jesu:

$$p_{\text{aer}} = \rho_{\text{aer,disp}} g H_{\text{aer,disp}}$$

$$p_{\text{neaer}} = \rho_{\text{neaer,disp}} g H_{\text{neaer,disp}}$$

Razlika između ta dva tlaka (uz činjenicu da su visine disperzije u reaktoru jednake) jest:

$$p_{\text{aer}} - p_{\text{near}} = g H_{\text{disp}} (\rho_{\text{aer,disp}} - \rho_{\text{near,disp}}) \quad \mathbf{X-1}$$

Uzimajući u obzir da su gustoće disperzije ovisne o udjelu zraka u disperziji:

$$\rho_{\text{aer,disp}} = \rho_L (1 - \varepsilon_{g,\text{aer}})$$

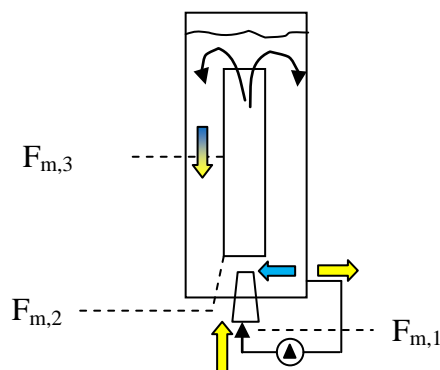
$$\rho_{\text{near,disp}} = \rho_L (1 - \varepsilon_{g,\text{near}})$$

dobivamo:

$$\Delta p = \rho_L g H_L (\varepsilon_{g,\text{aer}} - \varepsilon_{g,\text{near}}) \quad \mathbf{X-2}$$

Razlika u zagradi je razlika u volumnom udjelu zraka u disperziji nearirane (silazne) i aerirane (uzlazne) sekcije.

Cirkulacijski broj (faktor): Bezdimenzijska veličina, omjer masenog protoka podloge u kružnom usmjerenom gibanju i masenog protoka medija koji je kružno gibanje izazvao.



Pod djelovanjem pumpe kroz sapnicu prolazi maseni protok podloge $F_{m,1}$. Djelovanjem sapnice dolazi do prijenosa momenta, usisavanja zraka, pojave razlike tlaka i do kružnog (cirkulacijskog) gibanja podloge. Kroz centralnu aeracijsku cijev giba se podloga masenim protokom $F_{m,3}$. Taj protok nužno sadrži u sebi i $F_{m,1}$. Razlika $F_{m,3} - F_{m,1}$ je zapravo maseni protok podloge stavljen u kružno gibanje $F_{m,2}$.

$$n_c = \frac{F_{m,3}}{F_{m,1}} = \frac{F_{m,2} + F_{m,1}}{F_{m,1}} = 1 + \frac{F_{m,2}}{F_{m,1}} \quad \mathbf{X-3}$$

Srednja cirkulacijska brzina Omjer cirkulacijskog volumnog protoka i poprečnog presjeka kroz koji taj protok nastružava. Pod pretpostavkom da na jedan smjer gibanja podloge otpada površina presjeka unutrašnje cijevi (~polovica presjeka reaktora!) i uz primjenu odnosa masenog i volumnog protoka te uz jed. X-3, jednačba glasi:

$$w_{m,c} = \frac{F_{v,3}}{0,5 D_R^2 \pi/4} = \frac{8 F_{v,3}}{D_R^2 \pi} = \frac{8 F_{m,3}}{\rho_m D_R^2 \pi} = \frac{8 F_{m,1} n_c}{\rho_m D_R^2 \pi} \quad \text{X-4}$$

ρ_m = srednja gustoća medija u cirkulacijskom toku.

Srednje cirkulacijsko vrijeme: Odnos cirkulacijske dužine i srednje cirkulacijske brzine. Za cirkulacijsku dužinu se uzima dvostruka visina reaktora.

$$t_c = \frac{2 H}{w_m} \quad \text{X-5}$$

Vrijeme zadržavanja mlaza: Omjer mase disperzije (podloga + zrak) i masenog protoka sapnice (može se pokazati da je jednak produktu cirkulacijskog broja i cirkulacijskog vremena.

$$t_z = \frac{m_{disp}}{F_{m,1}} = n_c t_c \quad \text{X-6}$$

Brzina mlaza (na otvoru sapnice): Odnos volumnog protoka i površine presjeka mlaznice.

$$w_1 = \left(\frac{4 F_{v,1}}{D_1^2 \pi} \right) = \left(\frac{4 F_{m,1}}{\rho_1 D_1^2 \pi} \right) \quad \text{X-7}$$

Re-broj mlaznice: $Re_1 = \left(\frac{w_1 D_1}{v_1} \right) = \left(\frac{w_1 D_1 \rho_1}{\eta_1} \right) = \left(\frac{4 F_{m,1}}{\pi \eta_1 D_1} \right) = \left(\frac{4 F_{m,1}}{v_1 \rho_1 \pi D_1} \right) \quad \text{X-8}$

Re-broj cirkulacijskog toka:

$$Re_m = \left(\frac{w_m D_R}{v_m} \right) = \left(\frac{w_m D_R \rho_m}{\eta_m} \right) = \left(\frac{8 F_{m,1} n_c}{\pi \eta_m D_R} \right) = \left(\frac{8 F_{m,1} n_c}{v_m \rho_m \pi D_R} \right) \quad \text{X-9}$$

$$\text{Odnos } Re_l/Re_m \quad \left(\frac{Re_m}{Re_l} \right) = 2 n_c \left(\frac{w_1 D_1 \rho_1}{w_m D_R \rho_m} \right) \quad \text{X-10}$$

Euler-ov broj: (broj otpora). Bezdimenzijska značajka, odnos između pada tlaka i kinetičke energije po jedinici volumena.

$$Eu = \left(\frac{\Delta p}{\rho_m w_m^2} \right) = \zeta_U \quad \text{X-11}$$

ζ_U = otpor gibanju podloge za ukupni cirkulacijski protok ($F_{m,3}$).

Za reaktore sa sapnicom vrijedi približno:

$$\zeta_U \approx \left(\frac{\rho_m}{2 \rho_1} \right) \left(\frac{D_1}{D_R n_c} \right)^{-2} \left(\frac{D_E}{D_R} \right)^{-2} \quad \text{X-12}$$

Povežemo li gornju jednadžbu s jednadžbom X-10, dobijemo:

$$\left(\frac{Re_m}{Re_l} \right) \approx \left(\frac{v_1}{v_m} \right) \left(2 \frac{\rho_m}{\rho_1} \right)^{0,5} \zeta_U^{-0,5} \left(\frac{D_E}{D_R} \right)^{-1} \quad \text{X-13}$$

Otpor cirkulaciji podloge (bez uračunatog doprinosa mlaza): Ukupni otpor se sastoji od parcijalnih otpora:

- otpora prouzročenog trenjem podloge sa stijenkom unutarnje cijevi (ζ_i),
- otpora prouzročenog trenjem podloge sa stijenkom vanjske cijevi reaktora (ζ_a),
- otpora strujanju oko gornjeg ruba centralne cijevi (ζ_o),
- otpora strujanju oko donjnjeg ruba centralne cijevi (ζ_u),

$$\zeta_U^* = \zeta_i + \zeta_a + \zeta_o + \zeta_u \quad \text{X-14}$$

Centralna cijev (sekcija): Dio reaktora s unutrašnjim kružnim tokom koji za reaktore oblika valjka ima oblik cijevi a služi za usmjeravanje podloge u kružni tok. Odnos promjera centralne cijevi i reaktora bira se tako da otpori budu minimalni (Sl. X-4).

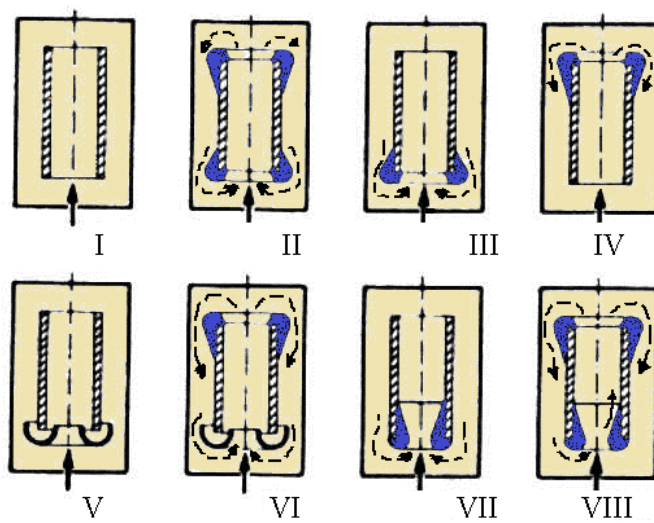
$$D_E:D_R = 0,55-0,65$$

Centralna cijev je uvijek kraća od reaktora i uvijek kraća od visine neaerirane podloge. Udaljenost centralne cijevi od podnice reaktora (A_u) računa se prema jednadžbi:

$$A_u = 0,15 \left(\frac{D_R^2}{D_E} \right) \quad \text{X-15}$$

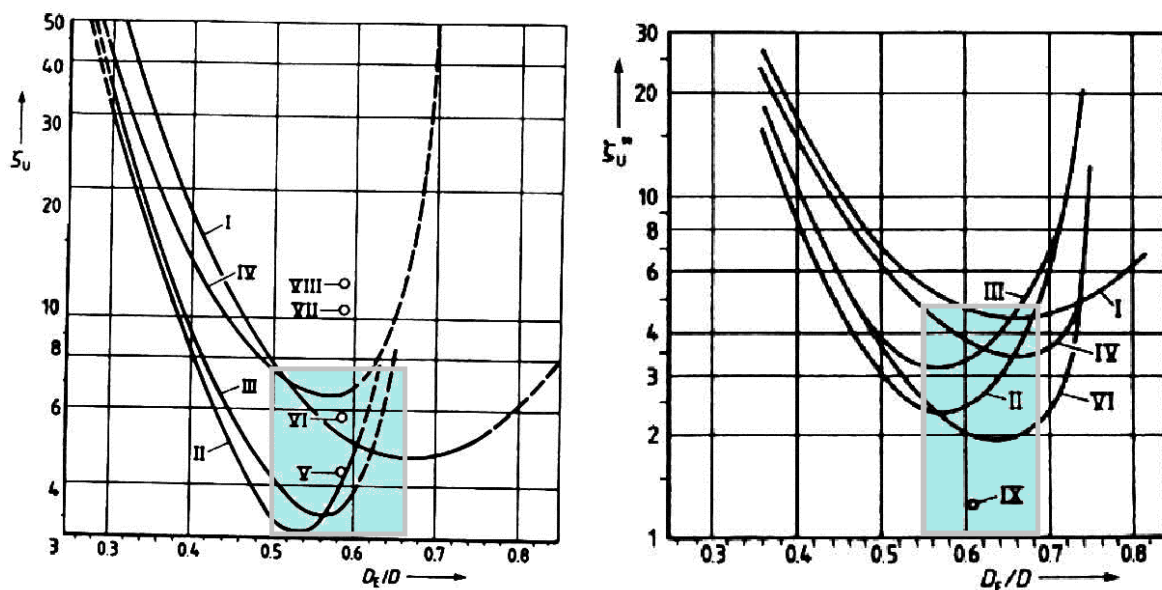
Visina sloja podloge iznad centralne cijevi (A_o) računa se prema jednadžbi:

$$A_o = 0,2 \left(\frac{D_R^2}{D_E} \right) \quad \text{X-16}$$



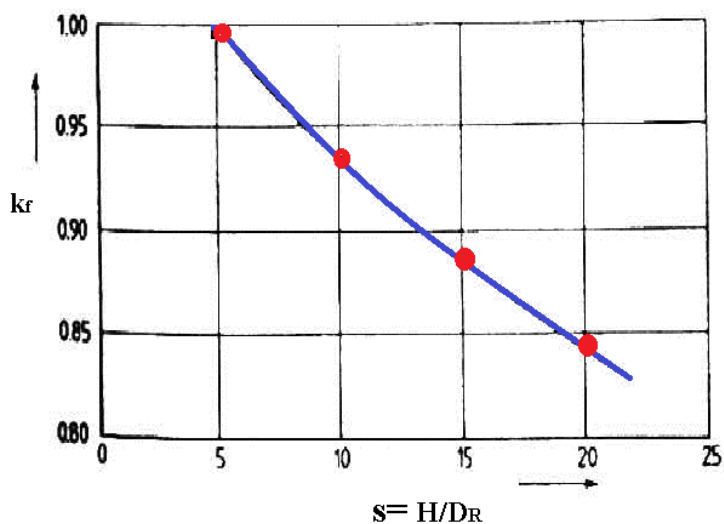
Sl. X-3

Konfiguracije centralnih cijevi u reaktoru s unutarnjim kružnim tokom u cilju smanjivanja otpora na rubovima cijevi. Plavom bojom su označeni zahvati u konstrukciji.



Sl. X-4 Područje minimalnih otpora ($\zeta_{m,3}$)/ukupnom cirkulacijskom toku ($F_{m,3}$)/lijevo/ i cirkulacijskom toku podloge bez uračunatog mlaza /desno/ za reaktore s vitkosti $H:D_R=5$ i konfiguracijama prikazanim na slici X-3.

Korekcija dimenzija: Kad se želi izraditi reaktor čija vitkost ($s=H:D_R$) je veća od 5, potrebno je uvesti korekciju u dimenzioniranju. U tu svrhu se korekcijski faktor (k_f) očitava iz slike X-5, a s njim se množi Re_m/Re_1 vrijednost dobivena iz jednadžbi X-10 i X-13.



Sl. X-5. Vrijednost korekcijskog faktora u ovisnosti o vitkosti reaktora.

Snaga cirkulacijskog toka: Snaga cirkulacijskog toka proizlazi iz razlike hidrostatskog tlaka i volumnog protoka podloge u kružnom gibanju. Uporabom prije pokazanih jednažbi, može se izvesti više konačnih izraza za tu veličinu.

$$\begin{aligned}
 P_c = F_{v,3} \Delta p &= \left(\frac{F_{m,3}}{\rho_m} \right) \Delta p \\
 &= \left(\frac{F_{m,3}}{\rho_m} \right) \Delta p \\
 &= F_{v,3} \left(\frac{\rho_m}{2} \right) w_m^2 \zeta_U \\
 &= F_{m,l} w_m^2 \zeta_U n_c \\
 &= \left(\frac{\pi}{16} \right) \rho_m D_R^2 w_m^3 \zeta_U \\
 &= \left(\frac{\pi}{16} \right) \rho_m Re_m^3 w_m^3 \zeta_U \quad \text{X-17}
 \end{aligned}$$

Snaga sapnice: Snaga koju ima mlaz na izlazu iz sapnice u reaktorima s dvofaznom sapnicom. U ispravno dimenzioniranom reaktoru snaga mlaza mora „pokriti“ snagu cirkulacijskog toka.

$$\begin{aligned}
 P_{s,L} = F_{v,1} P_l &= \left(\frac{\pi}{8} \right) \rho_l D_l^2 w_l^3 \zeta_U \\
 &= \left(\frac{\pi}{8} \right) \rho_l v_l^3 Re_l^3 D_l^{-1} \quad \text{X-18}
 \end{aligned}$$

Primjedba: Prilikom proračuna snage potrebno je izračunatu snagu povećati uračunavajući koeficijent efikasnosti pumpe (oko 0,6).

Apsorpcijski broj: Bezdimenzijska veličina koja karakterizira prijenos mase a koristi se za barbotirajuće sustave i dvofazne sapnice.

$$Y = \left(\frac{OTR}{H F_g (\Delta C)_{Ln}} \right) \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = \left(\frac{k_L a}{w_g} \right) \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} \quad \text{X-19}$$

OTR = maseni protok kisika prenešenog u podlogu u [kg/h]

Disperzijski broj: Bezdimenzijska veličina koja karakterizira disperziju plinske faze.

$$X_n = \left(\frac{P_{s,L}/F_{g,s}}{(v^2 g)^{2/3} \rho} \right) \quad X-20$$

Za proračunavanje injektora / ejektora potrebno je snimiti ili odrediti ovisnost $Y = f(X_n)$ za svaku podlogu.

$$Y = K_1 (X_n)^{k_2} \quad X-21$$

K_1 se nalaze u rasponu 1×10^{-5} - $2,4 \times 10^{-5}$

k_2 se nalaze u rasponu 0,2-0,5

Y se za „slot“ injektore kreću u rasponu 8×10^{-5} - 18×10^{-5}

Snaga adijabatskog kompresora: Snaga potrebna da bi kompresor utisnuo zrak u sapnicu (injektor).

$$P_k = \frac{\kappa}{\kappa-1} F_g p_{atm} \left[\frac{p}{p_{atm}}^{(\kappa-1/\kappa)} - 1 \right] \quad X-22$$

p = tlak na koji treba stlačiti zrak, tj. tlak na mjestu montaže sapnice, jednak je zbroju hidrostatskog tlaka, tlaka iznad površine podloge, i otpora prolazu zraka kroz sapnicu.

$$p = \Delta p_s + \rho g H_L + p_{atm}$$

$\kappa = 1,4$ za zrak, izentropski eksponent (odnos specifičnih toplinskih kapaciteta kod konstantnog tlaka i konstantnog volumena).

Primjedba: ovako izračunatu snagu potrebno je još uvećati za stupanj iskorištenje kompresora (oko 0,6)