



FKITMCMXIX

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije



# Reaktori i bioreaktori

## Bioreaktori

Prof. dr. sc. Zvezdana Findrik Blažević

# Reaktori-Bioreaktori

R E A K T O R JE PROCESNI UREĐAJ U  
KOJEMU SE PROVODI KEMIJSKA REAKCIJA

B I O R E A K T O R JE PROCESNI UREĐAJ  
U KOJEMU SE PROVODI BIOPROCES

# Bioreaktori - podjela

**FERMENTORI** su bioreaktori u kojima se neke tvari proizvode pomoću živih organizama (mikroorganizama-bakterija, gljivica) ili njihovih dijelova (stanica).

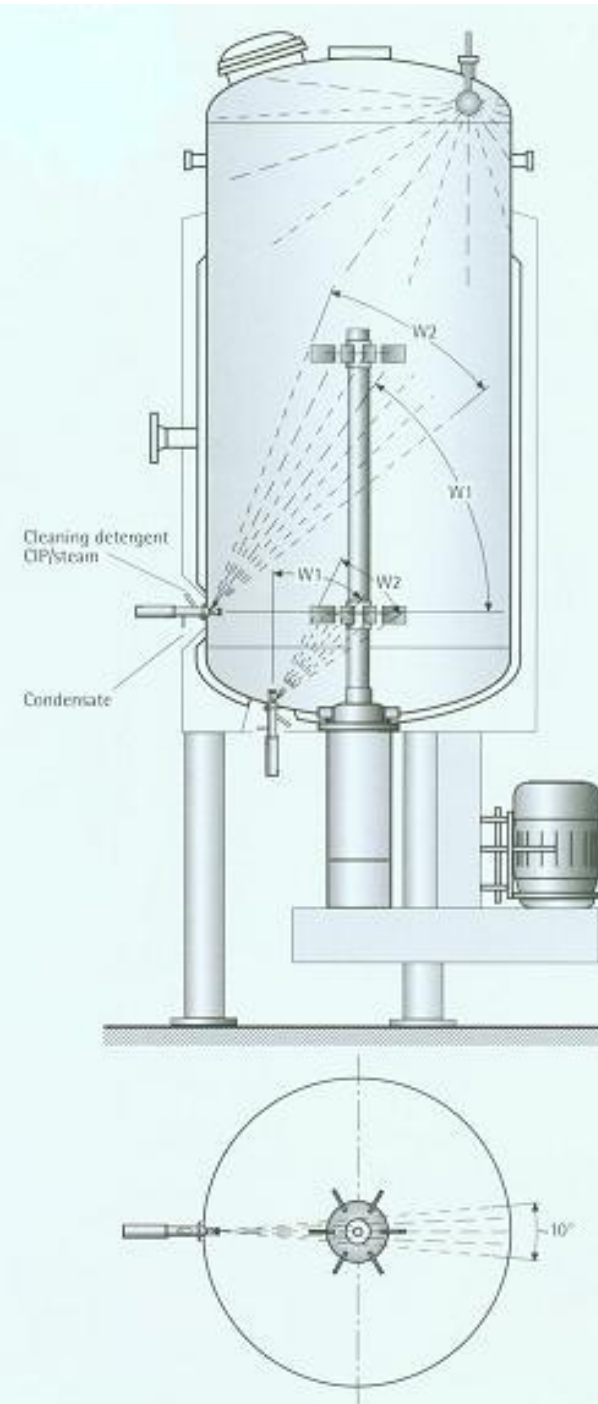
- u njima rastu mikroorganizmi i potrebno im je dovoditi hranu

**ENZIMSKI REAKTORI** su bioreaktori u kojima bioprocese kataliziraju biokatalizatori.

- u njima nema rasta biološkog materijala, već protein izdvojen iz stanice mikroorganizma služi kao biokatalizator

# Bioreaktori

Bioreaktor je centralni dio biokemijskog procesa. Kombiniranjem znanja iz kinetike bioloških procesa s bilancama tvari i energije, možemo dizajnirati i analizirati događanja u bioreaktoru.



# Idealni tipovi reaktora

## POJAM "IDEALNOG" REAKTORA

1. Pretpostavka o idealnom miješanju
2. Pretpostavka o idealnom strujanju
3. Pretpostavka o nepostojanju difuzijskog prijenosa tvari i topline
4. Pretpostavka o izotermnom radu reaktora
5. Pretpostavka o stacionarnom radu

# Idealni tipovi reaktora

Rade u stacionarnom stanju



Kotlasti (šaržni) reaktor



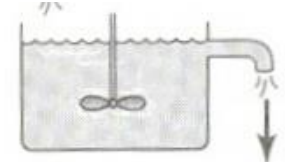
Homogen sastav u reaktoru koji se s vremenom mijenja. Pretpostavka idealnog miješanja. Reaktor radi u nestacionarnom stanju.

Cijevni reaktor



Fluid prolazi kroz reaktor te se ne miješa. Reaktor radi u stacionarnom stanju. Pretpostavka idealnog strujanja.

Protočno kotlasti reaktor



Homogen sastav u reaktoru koji se ne mijenja s vremenom. Reaktor radi u stacionarnom stanju. Pretpostavka idealnog miješanja.

# Proces

## STACIONARAN PROCES

Proces je stacionaran ako se procesne varijable (koncentracija, protok, temperatura, tlak itd.) ne mijenjaju s vremenom.

## NESTACIONARAN PROCES

Proces je nestacionaran ako je bilo koja procesna varijabla funkcija vremena, tj. ako se mijenja s vremenom.

# Bilanca tvari u reaktorima

Nestacionarni kemijski proces:

Reaktant:

$$\begin{array}{cccc} \text{BRZINA} & \text{BRZINA} & \text{BRZINA} & \text{BRZINA} \\ \text{ULAZA} - & \text{POTROŠNJE} & \text{IZLAZA} & \text{AKUMULACIJE} \\ \text{TVARI} & \text{REAKCIJOM} & \text{TVARI} & \text{TVARI} \end{array}$$

Produkt:

$$\begin{array}{cccc} \text{BRZINA} & \text{BRZINA} & \text{BRZINA} & \text{BRZINA} \\ \text{ULAZA} + & \text{NASTANKA} & \text{IZLAZA} & \text{AKUMULACIJE} \\ \text{TVARI} & \text{REAKCIJOM} & \text{TVARI} & \text{TVARI} \end{array}$$



# Bilanca tvari u reaktorima

Stacionarni kemijski proces:

Reaktant:

$$\begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{ULAZA} \\ \text{TVARI} \end{array} - \begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{POTROŠNJE TVARI} \\ \text{REAKCIJOM} \end{array} - \begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{IZLAZA} \\ \text{TVARI} \end{array} = 0$$

Produkt:

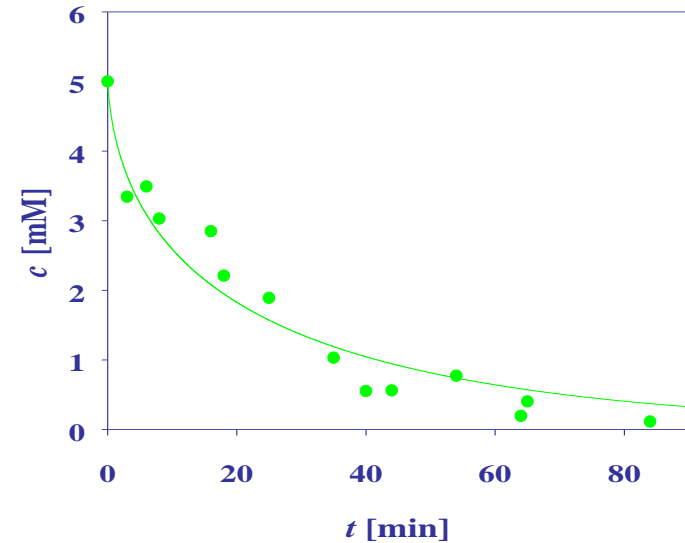
$$\begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{ULAZA} \\ \text{TVARI} \end{array} + \begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{NASTANKA TVARI} \\ \text{REAKCIJOM} \end{array} - \begin{array}{l} \text{BRZINA} \\ \text{IZLAZA} \\ \text{TVARI} \end{array} = 0$$

# Kotlasti (šaržni) bioreaktor - KR

eng. batch reactor

## Idealni kotlasti (bio)reaktor

karakterizira homogen sastav reakcijske smjese tj. jednak sastav reakcijske otopine u svakoj točki u reaktoru. Sastav u reaktoru se mijenja u vremenu, kao i brzina kemijske reakcije. Na početku procesa stavimo reakcijsku smjesu u reaktor, dodajemo (bio)katalizator, te se reaktant troši s vremenom.



Idealan kotlasti (bio)reaktor radi u izotermnim uvjetima, što znači da je temperatura konstantna. Volumen ovog reaktora je konstantan, te nema promjene gustoće s vremenom.

Kad reakcija završi, (bio)reaktor se otvara, te se reakcijska smjesa uklanja iz reaktora. Pošto se radi o nestacionarnom procesu koji ima svoj početak i kraj, za njega pišemo **integralnu** bilancu tvari.

Kotlasti reaktor nikada ne punimo do maksimalnog volumena, već do približno  $\frac{3}{4}$  ukupnog volumena (maksimalno).

Za idealni kotlasti reaktor možemo pisati bilance tvari kako slijedi:

# Kotlasti bioreaktor

## Bilanca tvari za reaktant A:

Ulaz – Izlaz - Nestajanje = Akumulacija

$$0 - 0 + (-r_A) \cdot V_r = \frac{dn_A}{dt} \quad (1)$$

Volumen reaktora je konstantan, pa se integriranjem se dobije reakcijsko vrijeme:

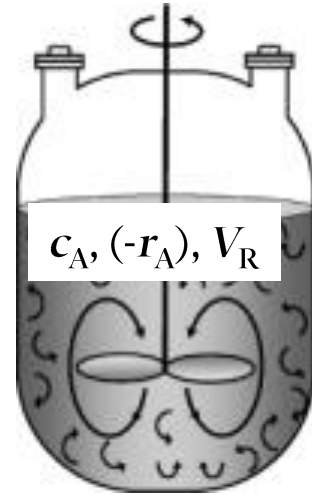
$$t_r = -\frac{1}{V_r} \int_{n_{Ao}}^{n_A} \frac{dn_A}{r_A} \quad (2)$$

Pri stalnoj gustoći u reaktoru je:

$$c_A = \frac{n_A}{V_r} \quad (3)$$

pa se jednačba (2) može pisati u obliku:

$$t_r = -\int_{c_{Ao}}^{c_A} \frac{dc_A}{r_A} \quad (4)$$



$$V_r = \frac{3}{4} V_R$$

Uz konverziju:  $X_A = \frac{c_{Ao} - c_A}{c_{Ao}}$

jednačba (4) prelazi u oblik:

$$t_r = c_{Ao} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \quad (5)$$

UKUPNO VRIJEME RADA REAKTORA

$$t_R = t_{pu} + t_r + t_{pr} \quad (6)$$

$r_A$  – brzina reakcije, brzina nestajanja reaktanta A

# Kotlasti reaktor

## Bilanca tvari za reaktant A:

$$0 - 0 + (-r_A) \cdot V_r = \frac{dn_A}{dt} / : V_r$$

$$-r_A = \frac{dc_A}{dt}$$

## Reakcija I reda

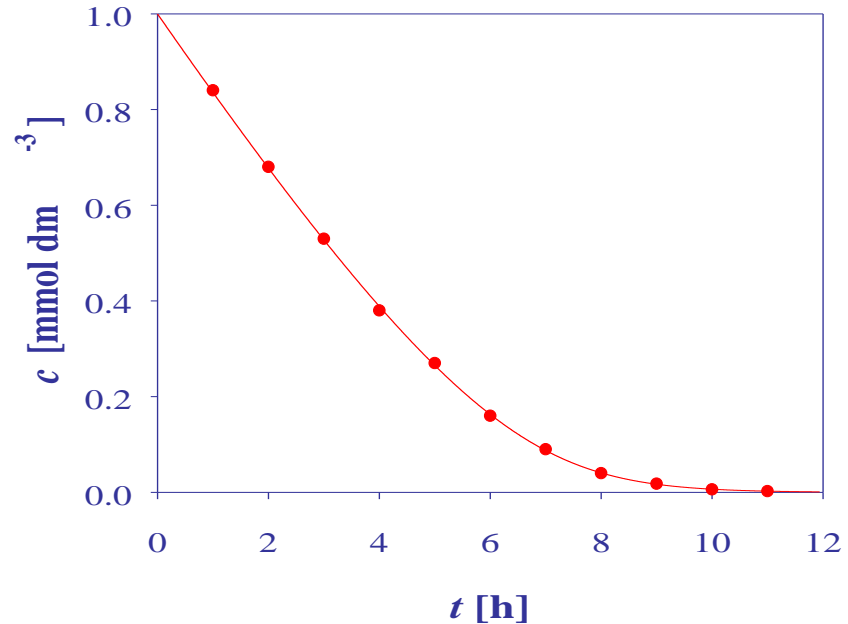
$$r_A = k_1 \cdot c_A$$

$$\frac{dc_A}{dt} = -k_1 \cdot c_A$$

Matematički model reaktora omogućava procjenu kinetičkih konstanti iz eksperimentalnih podataka:

Metoda Runge-Kutta – iterativna metoda za rješavanje diferencijalnih jednažbi

Parametar	Vrijednost
$c_{A0}$ [mol L <sup>-1</sup> ]	1
$k$ [s <sup>-1</sup> ]	2,78*10 <sup>-4</sup>
( $k$ [h <sup>-1</sup> ])	1



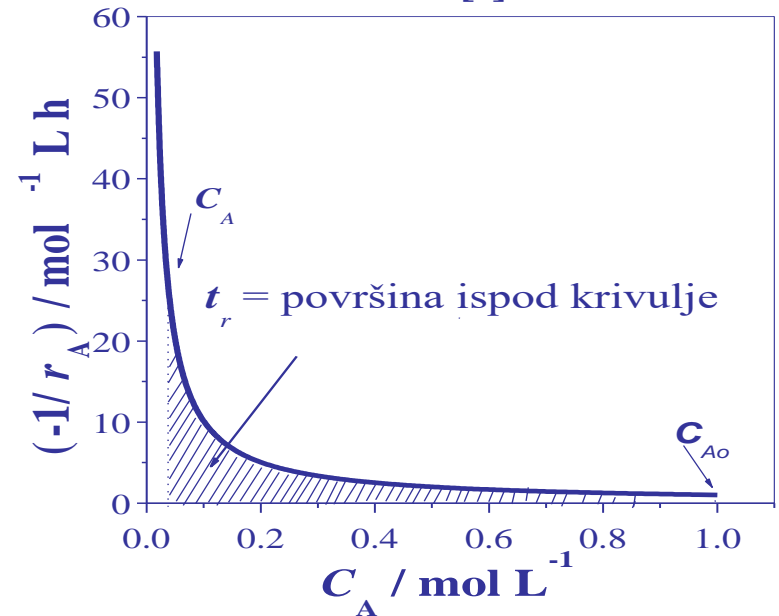
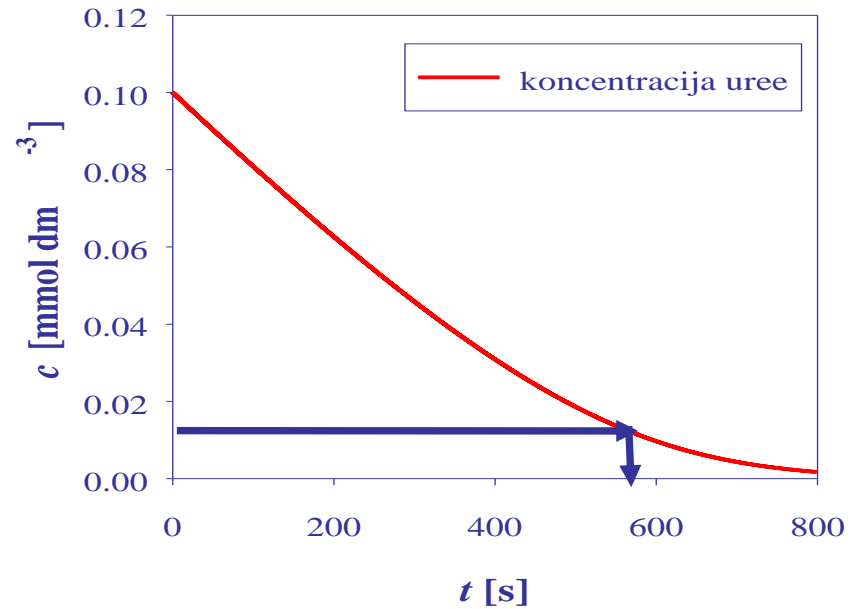
# Kotlasti reaktor

Matematički model reaktora omogućava proračun reakcijskog vremena te simulaciju procesa:

$$t_r = - \int_{c_{Ao}}^{c_A} \frac{dc_A}{r_A}$$

$$t_r = c_{Ao} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A}$$

Simpsonova metoda integracije



# Kotlasti bioreaktor

- Bilance tvari u kotlastom bioreaktoru (reaktorski model):
  - Za biomasu
  - Za supstrat i/ili produkt

## Bilanca za supstrat (reaktant):

Ulaz – Izlaz - Nestajanje = Akumulacija

$$0 - 0 + (-r_s) \cdot V_r = \frac{dS}{dt} \cdot V_r$$

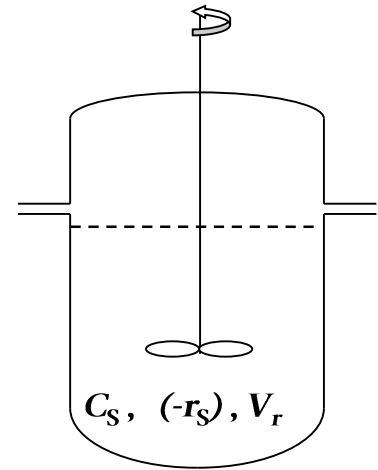
Supstrat se (poput reaktanta u reaktoru) u bioreaktoru troši brzinom  $r_s$

## Bilanca za biomasu

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

Dio supstrata se u bioreaktoru troši na rast biomase, a dio na nastanak produkata u biokemijskim reakcijama. Dio supstrata koji se utrošio na rast biomase je određen koeficijentom iskorištenja  $Y_{X/S}$ . Brzina nastajanja biomase je povezana s brzinom potrošnje supstrata preko navedenog koeficijenta.

$$(-r_s) = \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \frac{dX}{dt} \quad r_x = \frac{dX}{dt}$$



$S$  - koncentracija supstrata  
 $X$  - koncentracija biomase  
 $Y$  - koeficijent iskorištenja  
 $r_x$  - brzina nastajanja biomase  
 $r_s$  - brzina potrošnje supstrata  
 $V_r$  - volumen reaktora

# Kotlasti bioreaktor

## Bilanca za biomasu:

Nastajanje = Akumulacija

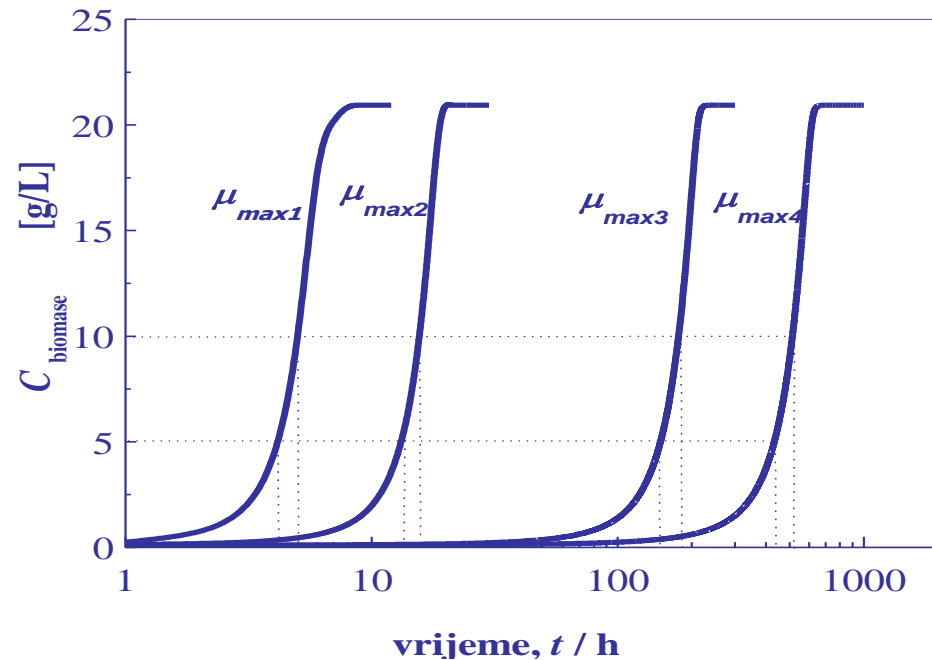
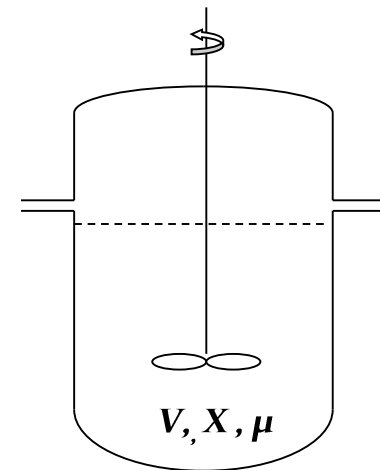
$$r_X \cdot V = \frac{d(X \cdot V)}{dt}$$

$$\mu \cdot X \cdot V = \frac{d(X \cdot V)}{dt} / : V$$

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

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \cdot c_S}{K_S + c_S}$$

Parametar	Vrijednost
$C_{Xo}$ [g L <sup>-1</sup> ]	0,1
$C_{So}$ [g L <sup>-1</sup> ]	10
$K_S$ [g L <sup>-1</sup> ]	1
$Y_G$ [-]	0,48



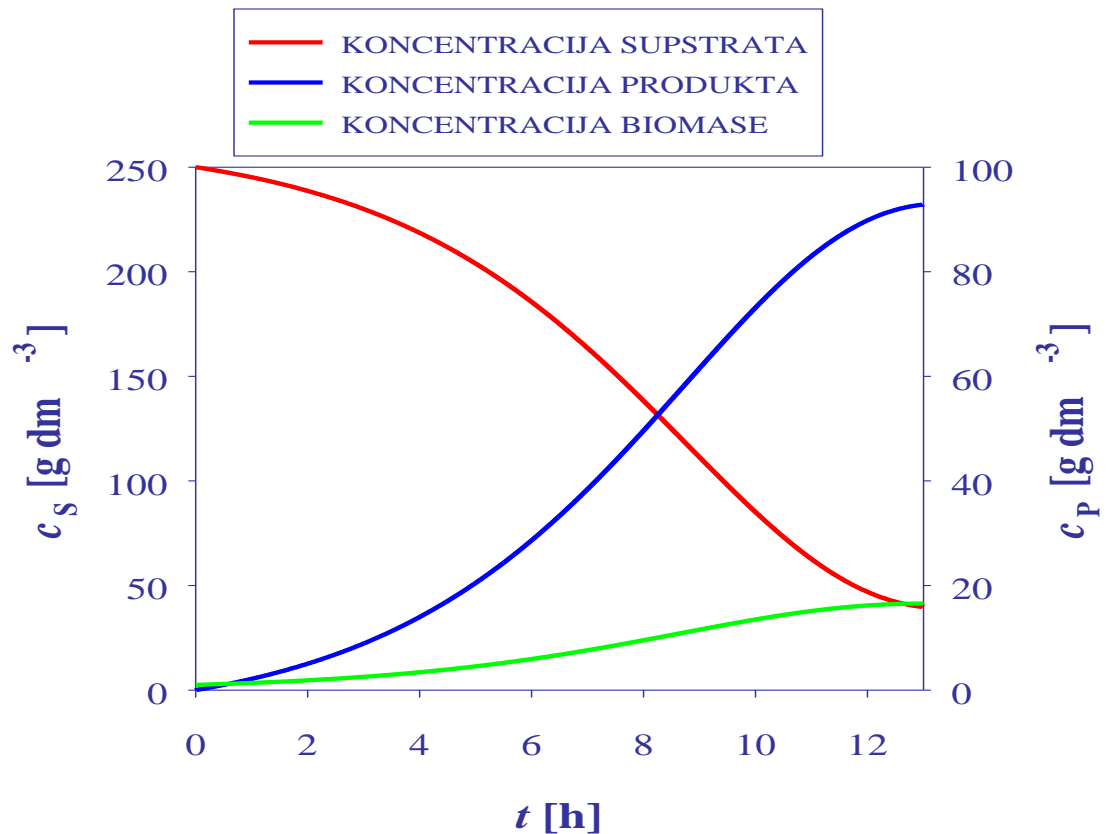
Tijek krivulje nastajanja biomase ovisi o vrijednosti maksimalne specifične brzine rasta mikroorganizama,  $\mu_{\max}$ . Vrijeme fermentacije znatno ovisi o maksimalnoj specifičnoj brzini rasta biomase. Maksimalna specifična brzina rasta mikroorganizama ovisi o vrsti mikroorganizma. Neki mikroorganizmi rastu jako brzo, dok drugi rastu sporije.

# Kotlasti bioreaktor

Matematički model nam omogućava simulaciju rasta mikroorganizama i potrošnje supstrata – zato su nam potrebni kinetički parametri prikazani u tablici.

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$$

Parametar	Vrijednost
$\mu_{\max}$ (h <sup>-1</sup> )	0,5
$K_S$ (g/L)	0,5
$Y_{X/S}$ (-)	0,8
$S_0$ (g/L)	1,0

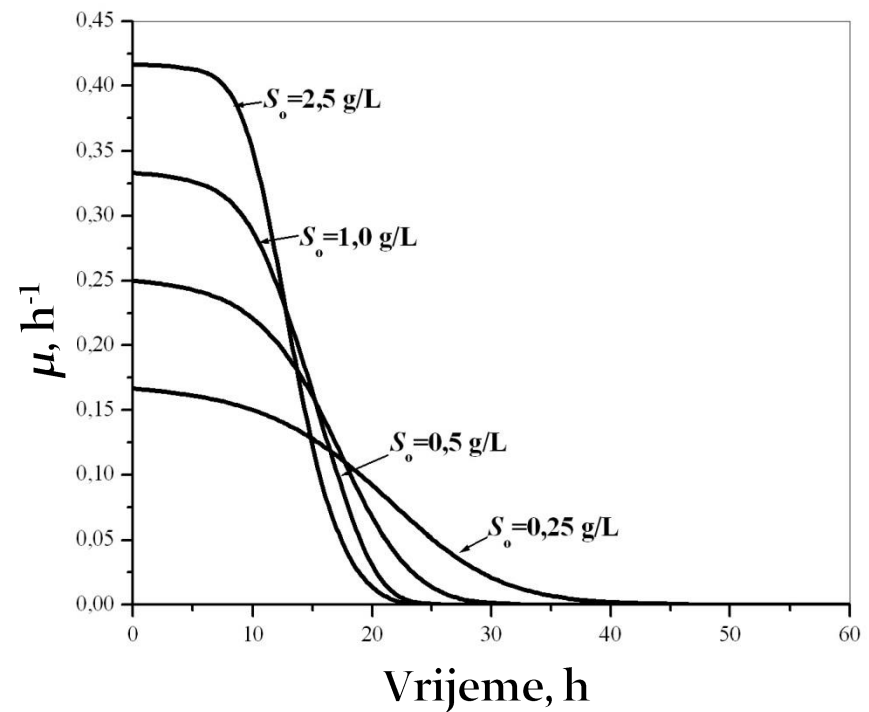
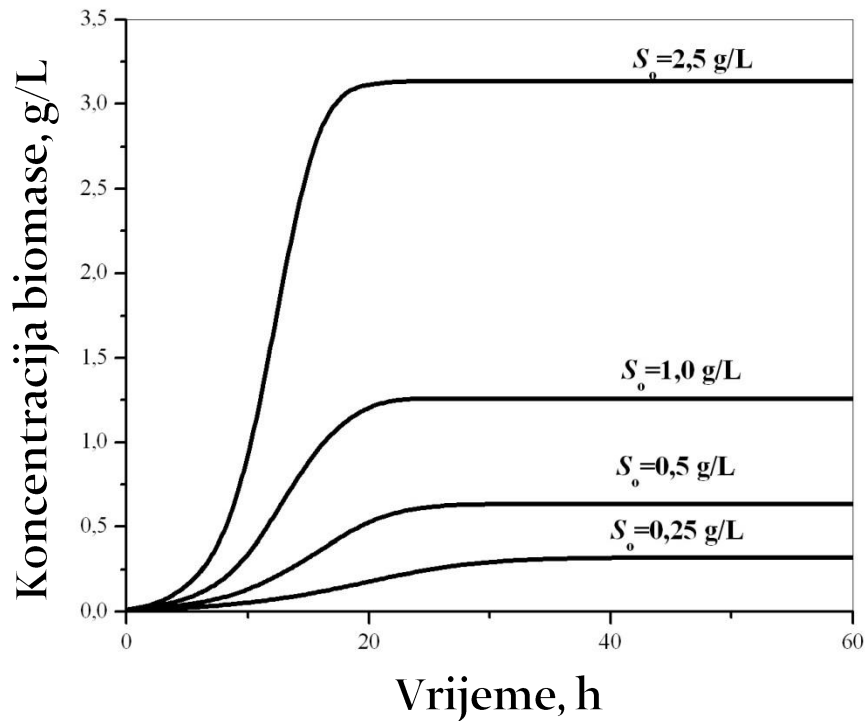


Na simulaciji vidimo da koncentracija supstrata pada, koncentracija biomase raste, te koncentracija produkta raste tijekom vremena – nestacionarni proces (procesne varijable se mijenjaju u vremenu) u kotlastom bioreaktoru. Supstrat se troši na nastajanje produkta i rast stanica.



# Kotlasti bioreaktor

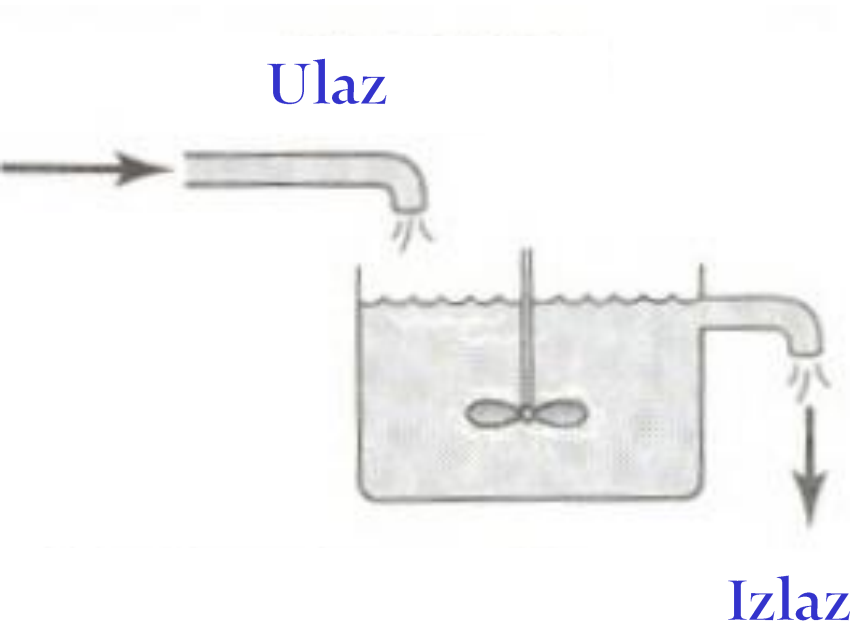
$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S} \quad \text{Monodova kinetika rasta biomase}$$



Simulacije omogućuju prikazivanje različitih ovisnosti bez potrebe za provođenjem eksperimenata. *Lijeva slika:* Konačna koncentracija biomase u bioreaktoru ovisi o koncentraciji supstrata. Mikroorganizam ne može narasti ako nema hrane – supstrata. Neki su mikroorganizmi inhibirani sa supstratom, pa veća koncentracija supstrata u bioreaktoru ne znači da će mikroorganizam više narasti. *Desna slika:* Specifična brzina rasta biomase ovisi o koncentraciji supstrata. Što je koncentracija supstrata veća, to je moguće postići veću specifičnu brzinu rasta biomase.

# Protočni kotlasti reaktor - PKR

eng. CSTR ("continuous stirred tank reactor")



Za **idealni protočni kotlasti (bio)reaktor** vrijedi da je idealno miješan, te da je kemijski sastav u svakoj točki (bio)reaktora isti. Znači miješanjem se ostvaruje homogeni sastav, pa je koncentracija unutar (bio)reaktora jednaka izlaznoj koncentraciji. Ovaj tip reaktora radi u stacionarnom stanju (nema promjene procesnih varijabli s vremenom). Kemijski sastav smjese se ne mijenja u vremenu. Za ovakav tip procesa pišemo **diferencijalnu bilancu tvari**.

Reaktor radi u izotermnim uvjetima, što znači da je temperatura u svakoj točki reaktora jednaka. Reaktor ima konstantan volumen, te nema promjene gustoće reakcijske otopine.

# Protočni kotlasti reaktor

## Bilanca tvari za reaktant A:

Ulaz – Izlaz - Nestajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_{ul} - F_{izl} + (-r_A) \cdot V_r = 0 \quad (1)$$

Kako je:

$$F_{izl} = F_{ul} \cdot (1 - X_A) \quad (2)$$

to jednažba (1) prelazi u oblik:

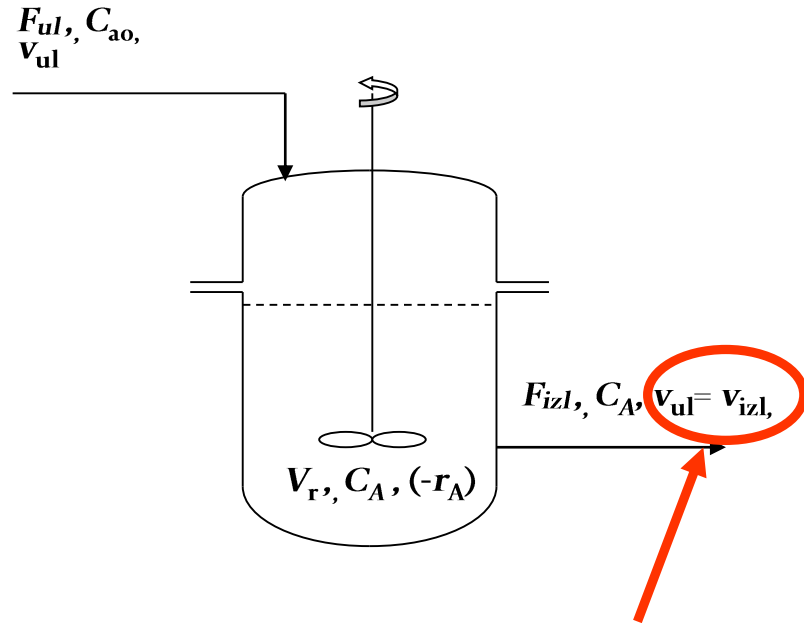
$$F_{ul} \cdot X_A = r_A \cdot V_r \quad (3)$$

Množinski (molarni) protok ( $F$  [mol/h]) je:

$$F_{ul} = c_{Ao} \cdot v_{ul} \quad (4)$$

Uvrštenjem izraza (4) u jednažbu (3) dobije se:

$$\frac{V_r}{v_{ul}} = \frac{c_{Ao} \cdot X_A}{r_A} = \frac{c_{Ao} - c_A}{r_A} \quad (5)$$



Da bi reaktor radio u stacionarnim uvjetima, ulazni i izlazni protok moraju biti jednaki

Kako je prostorno vrijeme zadržavanja:

$$\tau = \frac{V_r}{v_{ul}} \quad (6)$$

to je:

$$\tau = \frac{c_{Ao} \cdot X_A}{r_A} \quad (7)$$

# Protočni kotlasti reaktor

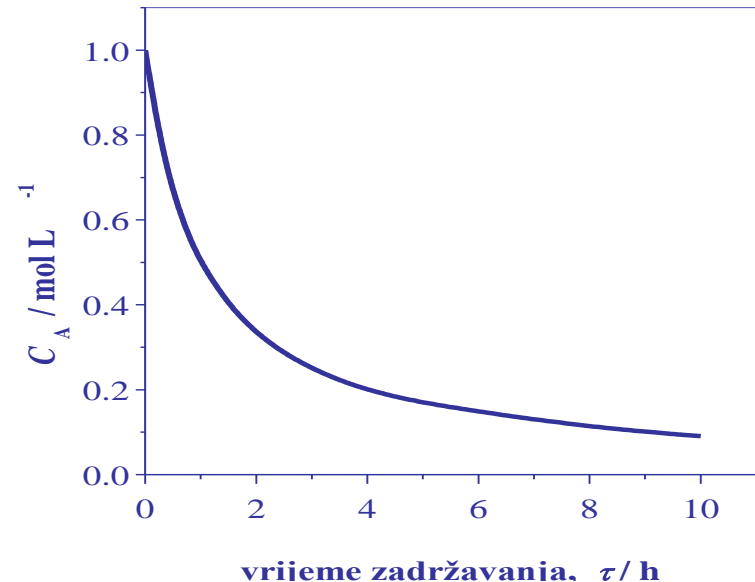
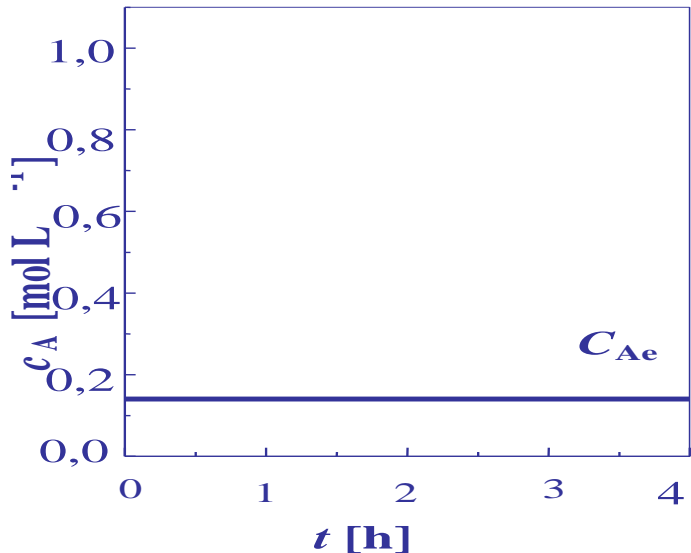
**Prostorno vrijeme zadržavanja** (eng. residence time),  $\tau$ , je prosječno vrijeme koje molekula provede unutar reaktora. Obzirom na konstantan volumen u idealnom PKR-u, možemo zaključiti da prostorno vrijeme zadržavanja ovisi isključivo o volumnom protoku reakcijske smjese. Koncentracija u PKR-u ovisi o prostornom vremenu zadržavanja, ali ne i o vremenu što se vidi iz simulacija na ovom slide-u.

## Bilanca tvari za reaktant A:

$$\frac{c_{Ao} - c_A}{\tau} = r_A$$

Reakcija I reda  $r_A = k_1 \cdot C_A$

Parametar	Vrijednost
$c_{Ao}$ [mol L <sup>-1</sup> ]	1
$k$ [s <sup>-1</sup> ]	2,78*10 <sup>-4</sup>
( $k$ [h <sup>-1</sup> ])	1



# Protočni kotlasti bioreaktor

## Kemostat (eng. chemostat)

Bilanca biomase:

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_{ul} \cdot X_0 - F_{izl} \cdot X + \mu \cdot X = \frac{d(X \cdot V)}{dt}$$

$$F_{ul} \cdot X_0 - F_{izl} \cdot X + \mu \cdot X = \frac{dX}{dt} \cdot V + \frac{dV}{dt} \cdot X$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{ul} - F_{izl} = 0; \quad F_{ul} = F_{izl} = F$$

Kao i u PKR-u, stacionarno je stanje uvjerovano jednakim protocima na ulazu i izlazu iz reaktora.

$$\frac{F}{V} (X_0 - X) + \mu \cdot X = \frac{dX}{dt};$$

$F$  – molarni protok

$X$  – koncentracija biomase

$D$  – brzina razrijeđenja

$V$  – volumen reaktora

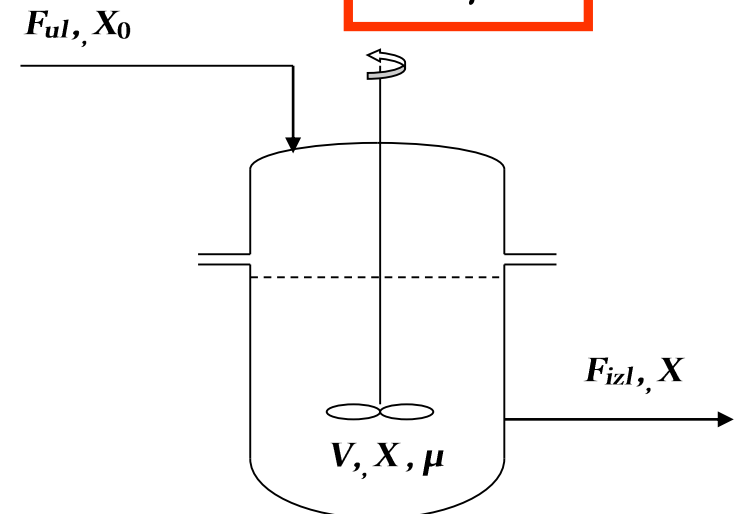
$$\frac{F}{V} = D \quad (\text{eng. dilution rate})$$

$$\frac{dX}{dt} = 0 \quad (\text{stacionaran proces})$$

Pretpostavka: početna koncentracija biomase se aproksimira nulom.

$$D \cdot (X_0 - X) = -\mu \cdot X; \quad X_0 = 0$$

$$D = \mu$$



# Protočni kotlasti bioreaktor Kemostat (eng. chemostat)

Bilanca supstrata:

Ulaz – Izlaz - Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_{ul} \cdot S_0 - F_{izl} \cdot S - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu \cdot X \cdot V_r = \frac{d(S \cdot V_r)}{dt}$$

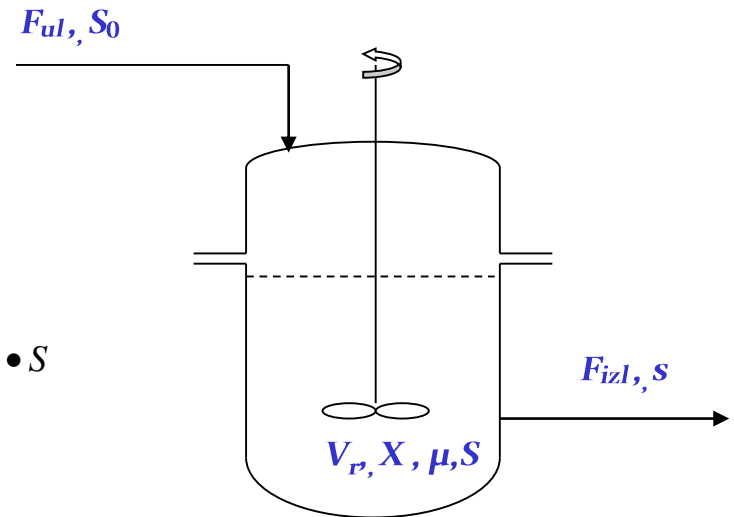
$$F_{ul} \cdot S_0 - F_{izl} \cdot S - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu \cdot X \cdot V_r = \frac{dS}{dt} \cdot V_r + \frac{dV_r}{dt} \cdot S$$

$$\frac{dV_r}{dt} = F_{ul} - F_{izl} = 0; \quad F_{ul} = F_{izl} = F$$

$$\frac{F}{V_r} (S_0 - S) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu \cdot X = \frac{dS}{dt}; \quad \frac{F}{V_r} = D \quad (\text{Dilution rate})$$

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (\text{stacionaran proces})$$

$$D \cdot (S_0 - S) = \frac{1}{Y_{X/S}} \mu \cdot X;$$



# Protočni kotlasti bioreaktor

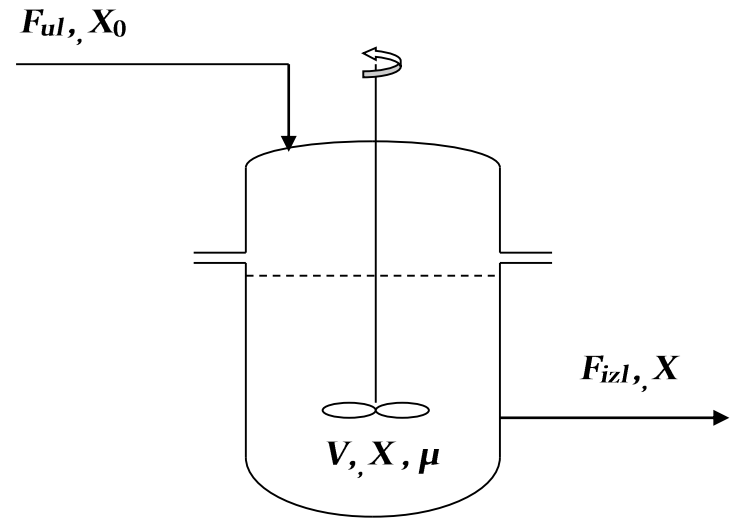
## Kemostat (eng. chemostat)

Kada je brzina protoka na ulazu jednaka onom na izlazu, kažemo da protočno kotlasti bioreaktor radi u stacionarnom stanju.

Razlika protočno kotlastog reaktora i bioreaktora je slijedeća: PKR karakteriziramo s prostornim vremenom zadržavanja,  $\tau$ , a kemostat s brzinom razrjeđenja,  $D$ , te u kemostatu imamo rast biomase.

Korištenje ovog tipa reaktora je dovelo do značajnih otkrića u proučavanju rasta biomase, razumijevanja staničnog ciklusa, metabolizma stanica i nastajanja produkta.

Regulacijom protoka supstrata se može regulirati brzina rasta biomase. Obzirom na to, ovaj se tip bioreaktora koristi za pročišćavanje otpadnih voda. Protokom otpadne vode čije onečišćenje služi kao hrana mikroorganizmima regulira se koncentracija biomase u bioreaktoru, što je značajno jer biomasu poslije treba zbrinuti (posebno treba paziti na zbrinjavanje biomase koja služi za uklanjanje jako toksičnih tvari).

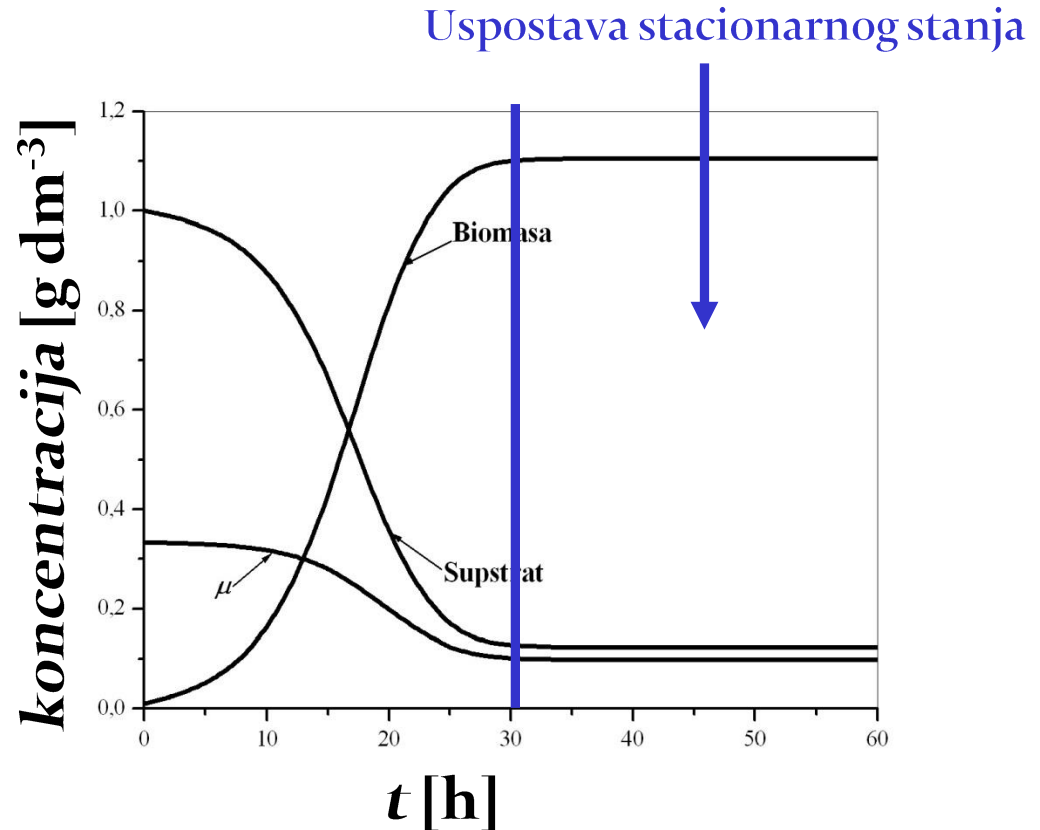


# Protočni kotlasti bioreaktor

## Kemostat (eng. chemostat)

Matematički model za ovaj reaktor nam omogućava simulaciju (oponašanje sustava) putem računalnog programa.

Parametar	Vrijednost
$D$ (h <sup>-1</sup> )	0,1
$m_{\max}$ (h <sup>-1</sup> )	0,5
$K_S$ (g/L)	0,5
$Y_{X/S}$ (-)	0,8
$S_0$ (g/L)	1,0

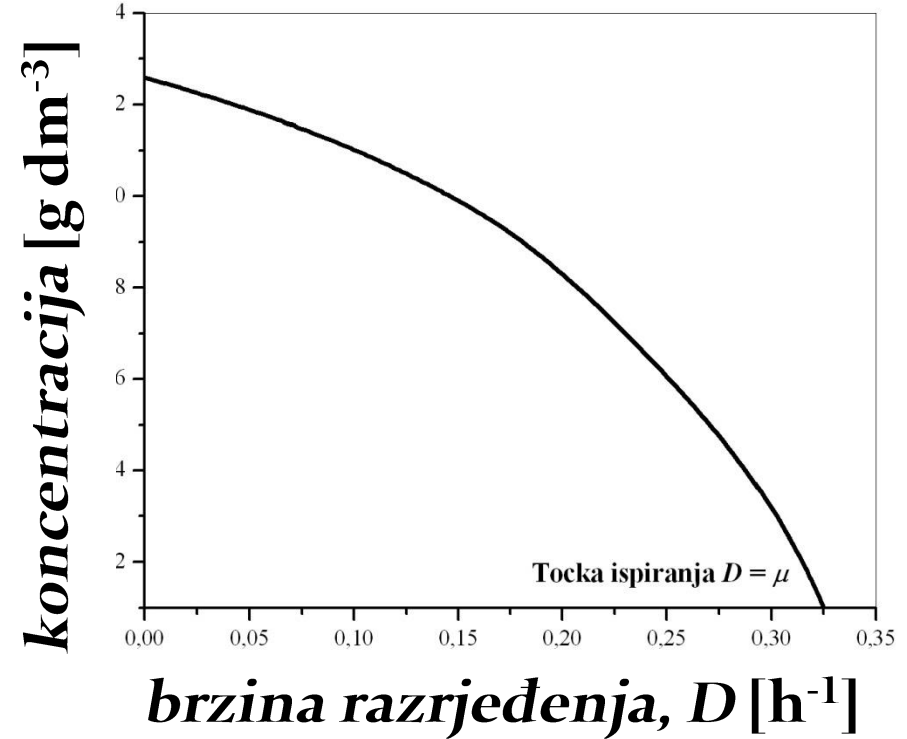
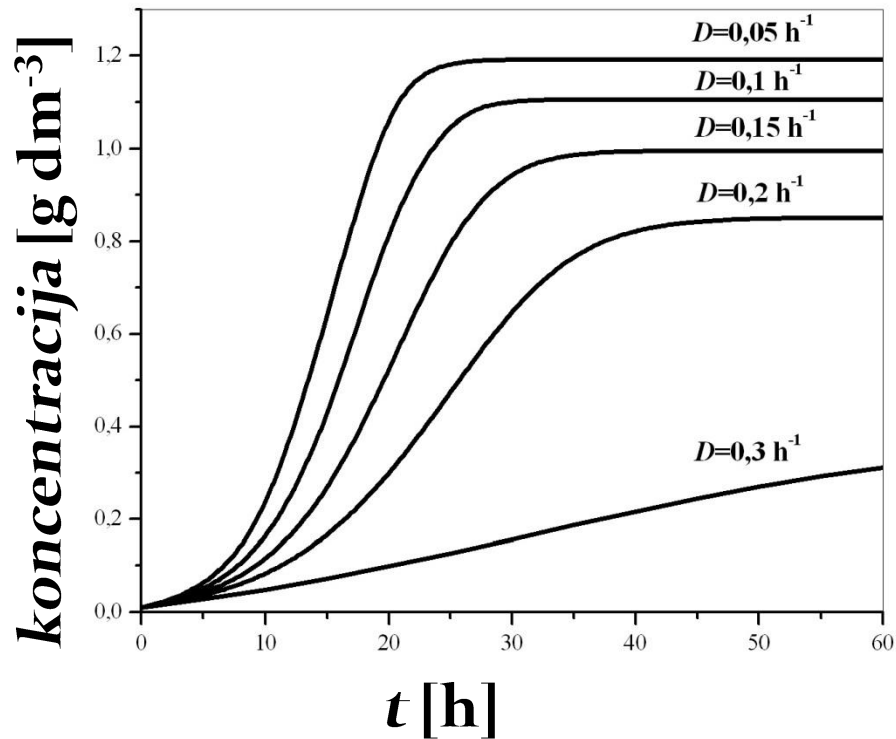


Povoljna konfiguracija reaktora za pročišćavanje otpadnih voda za koje je uobičajeno da rade kontinuirano, te da ne nastaje puno biomase (sekundarnog otpada).



# Protočni kotlasti bioreaktor

## Kemostat (eng. chemostat)



Simulacije pokazuju da povećanjem brzine razrjeđenja (povećanjem protoka) smanjujemo koncentraciju biomase u kemostatu, te je pri visokim brzinama razrjeđenja koncentracija stanica u bioreaktora je nula – kažemo da dolazi do ispiranja stanica iz bioreaktora.

# Kaskada protočnih kotlastih reaktora

Bilanca tvari za reaktant A za  $n$ -ti reaktor:

Ulaz – Izlaz + Nestajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_{An-1} - F_{An} + (-r_{An}) \cdot V_n = 0$$

Obzirom da je množinski protok:

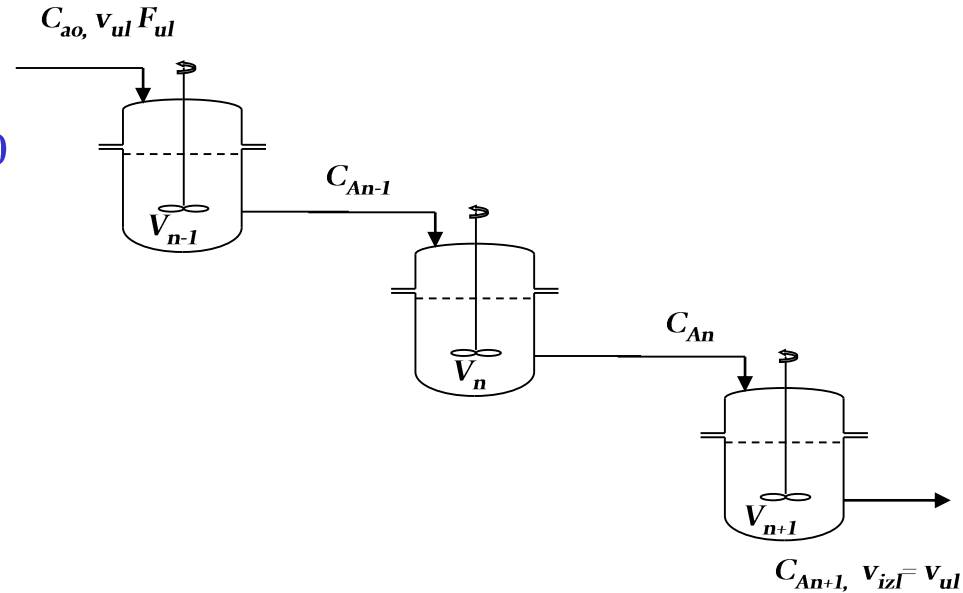
$$F_{An-1} = c_{An-1} \cdot v_{ul}$$

to se jed.(1) može napisati u obliku

$$c_{An-1} - c_{An} + (-r_{An}) \cdot \frac{V_n}{v_{ul}} = 0$$

odnosno

$$\tau = \frac{V_n}{v_{ul}} = \frac{c_{An-1} - c_{An}}{(-r_{An})}$$



# Kaskada protočnih kotlastih reaktora

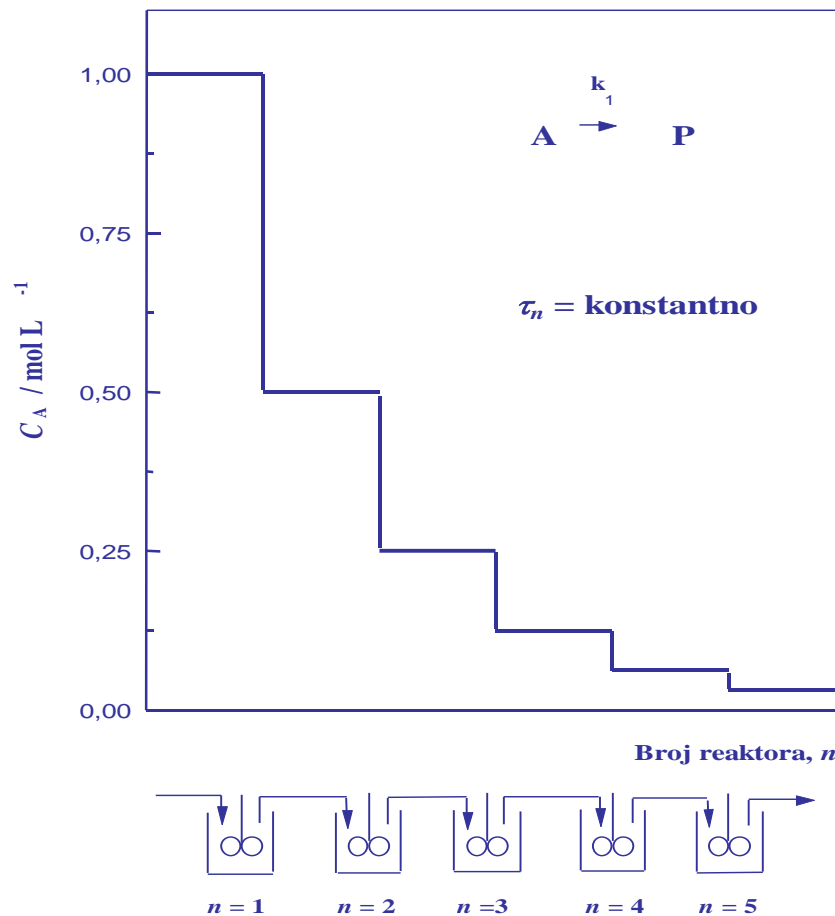
Bilanca tvari za reaktant A:



$$\frac{C_{An} - C_{An-1}}{\tau_n} = k_1 \cdot C_{An-1} = (-r_A)$$

Parametar	Vrijednost
$C_{Ao}$ [mol L <sup>-1</sup> ]	1
$k_1$ [s <sup>-1</sup> ]	$2,78 \cdot 10^{-4}$
$(k_1$ [h <sup>-1</sup> ])	1
$\tau_n$ [h]	1

$n$	$C_A$ [mol L <sup>-1</sup> ]
1	0,500
2	0,250
3	0,125
4	0,063
5	0,031



Na grafičkom prikazu (desno) može se vidjeti da se najveći stupanj smanjenja koncentracije reaktanta A (potencijalnog onečišćivala) postiže u prva tri reaktora. Daljnjim povećanjem broja reaktora postiže se skromno smanjenje koncentracije reaktanta A zbog koje nije ekonomski opravdano investirati u dodatne reaktore. U praksi se mogu naći 2-3 reaktora u kaskadi.

# Kaskada protočnih kotlastih bioreaktora

Bilanca biomase:

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

Bilanca biomase u bioreaktoru 1:

$$F_1 \cdot X_1 = \mu_1 \cdot X_1 \cdot V_1 / : X_1, V_1$$

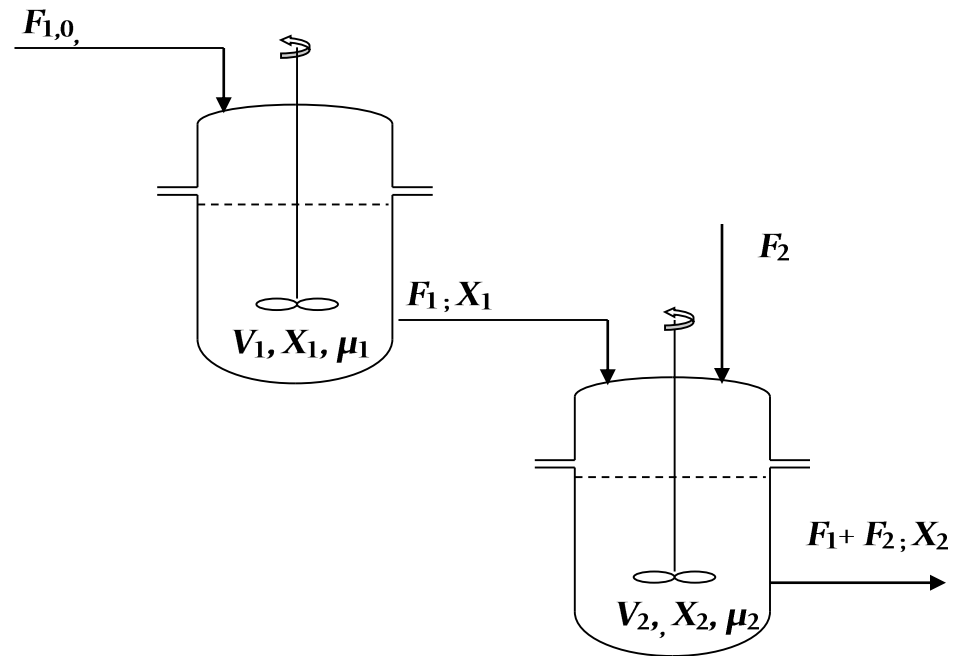
$$\mu_1 = D_1$$

Bilanca biomase u bioreaktoru 2:

$$F_1 \cdot X_1 - (F_1 + F_2) \cdot X_2 + \mu_2 \cdot X_2 \cdot V_2 = 0 / : X_2, V_2$$

$$\frac{F_1}{V_2} \cdot \frac{X_1}{X_2} - \frac{(F_1 + F_2)}{V_2} + \mu_2 = 0 / \cdot \frac{V_1}{V_2}$$

$$\mu_2 = D_2 - D_1 \cdot \frac{X_1}{X_2} \cdot \frac{V_1}{V_2}$$



Kaskada kemostata – važna konfiguracija za pročišćavanje otpadnih voda. U jednom se kemostatu ne može proizvesti dovoljno biomase da se ukloni sva organska tvar.

Ne želimo proizvesti niti previše biomase jer ju onda treba poslije zbrinuti.

# Kaskada protočnih kotlastih bioreaktora

## Bilanca supstrata:

Ulaz – Izlaz - Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

Bilanca supstrata u bioreaktoru 1:

$$F_{1,0} \cdot S_0 - F_1 \cdot S_1 = \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu_1 \cdot X_1 \cdot V_1 / : V_1$$

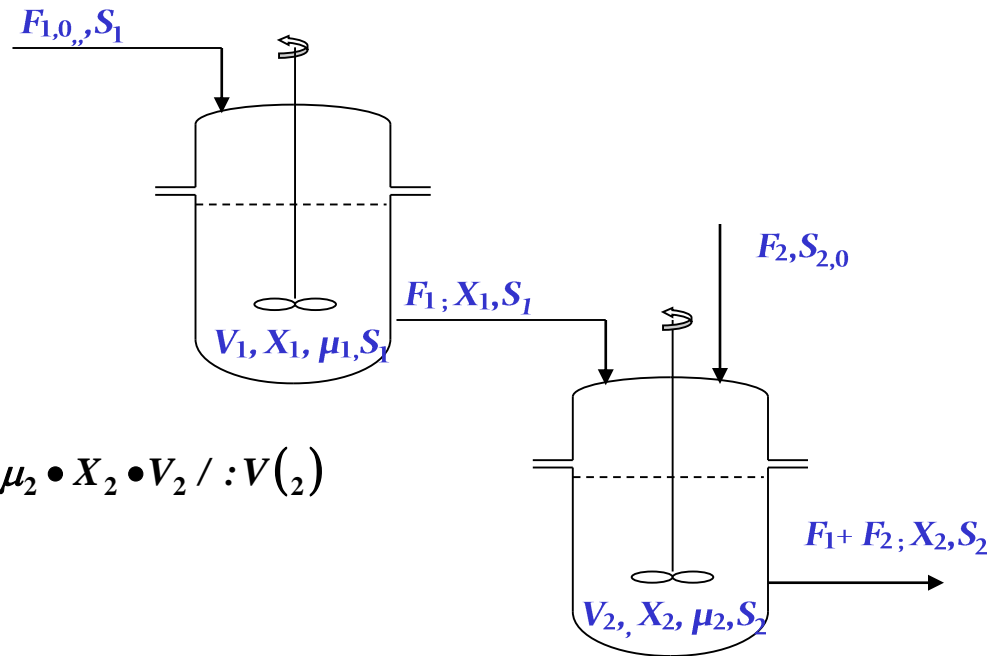
$$X_1 = \frac{Y_{X/S}}{\mu_1} \cdot (S_0 - S_1) \cdot D_1$$

Bilanca supstrata u bioreaktoru 2:

$$F_1 \cdot S_1 + F_2 \cdot S_{2,0} - (F_1 + F_2) \cdot S_2 = \left( \frac{1}{Y_{X/S}} \right)_2 \cdot \mu_2 \cdot X_2 \cdot V_2 / : V_2$$

$$D_2 = \frac{(F_1 + F_2)}{V_2}$$

$$X_2 = \frac{Y_{X/S}}{\mu_2} \cdot \left( \frac{F_1}{V_2} \cdot S_1 + \frac{F_2}{V_2} \cdot S_{2,0} - D_2 \cdot S_2 \right)$$



# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase

Bilanca biomase:

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_r \cdot X_0 - (F_0 + F_r) \cdot X_1 + \mu \cdot X_1 \cdot V = 0$$

$$\frac{F_r}{V} \cdot X_0 - \frac{(F_0 + F_r)}{V} \cdot X_1 + \mu \cdot X_1 = 0$$

$$\frac{F_r}{V} \cdot X_0 - \frac{F_0}{V} \cdot X_1 - \frac{F_r}{V} \cdot X_1 + \mu \cdot X_1 = 0$$

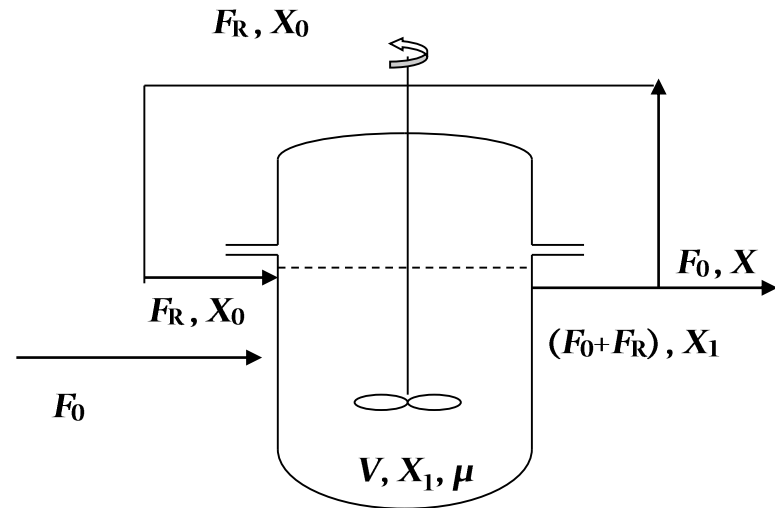
$$\frac{F_0}{V} = D \quad (\text{dilution rate - brzina razrijeđenja})$$

$$\frac{F_r}{V} \cdot X_0 - \left( D + \frac{F_r}{V} \right) \cdot X_1 + \mu \cdot X_1 = 0 / X_1$$

$$\mu = \left( D + \frac{F_r}{V} \right) - \frac{F_r}{V} \cdot \frac{X_0}{X_1}$$

$$\mu = D - \frac{F_r}{V} \left( 1 - \frac{X_0}{X_1} \right) ; a = \frac{F_r}{V} ; b = \frac{X_0}{X_1}$$

$$D = \mu + a(1 - b)$$



Ovakav reaktor radi u stacionarnim uvjetima. Povratkom dijela biomase u reaktor se prividno postiže povećana koncentracija mikroorganizama u reaktoru čime se povećava učinkovitost procesa radi veće koncentracije biokatalizatora u reaktoru (mikroorganizmi kataliziraju razgradnju tvari).

# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase

Bilanca supstrata:

Ulaz – Izlaz - Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

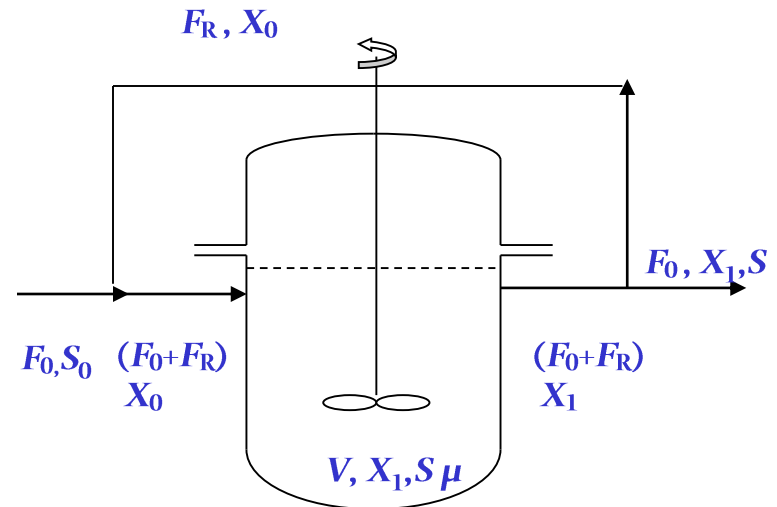
$$F_0 \cdot S_0 - F_0 \cdot S - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1 \cdot V_r = 0 / : V_r$$

$$\frac{F_0}{V_r} \cdot S_0 - \frac{F_0}{V_r} \cdot S - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1 = 0$$

$$\frac{F_0}{V_r} = D \quad (\text{Dilution rate})$$

$$D \cdot (S_0 - S) = \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1$$

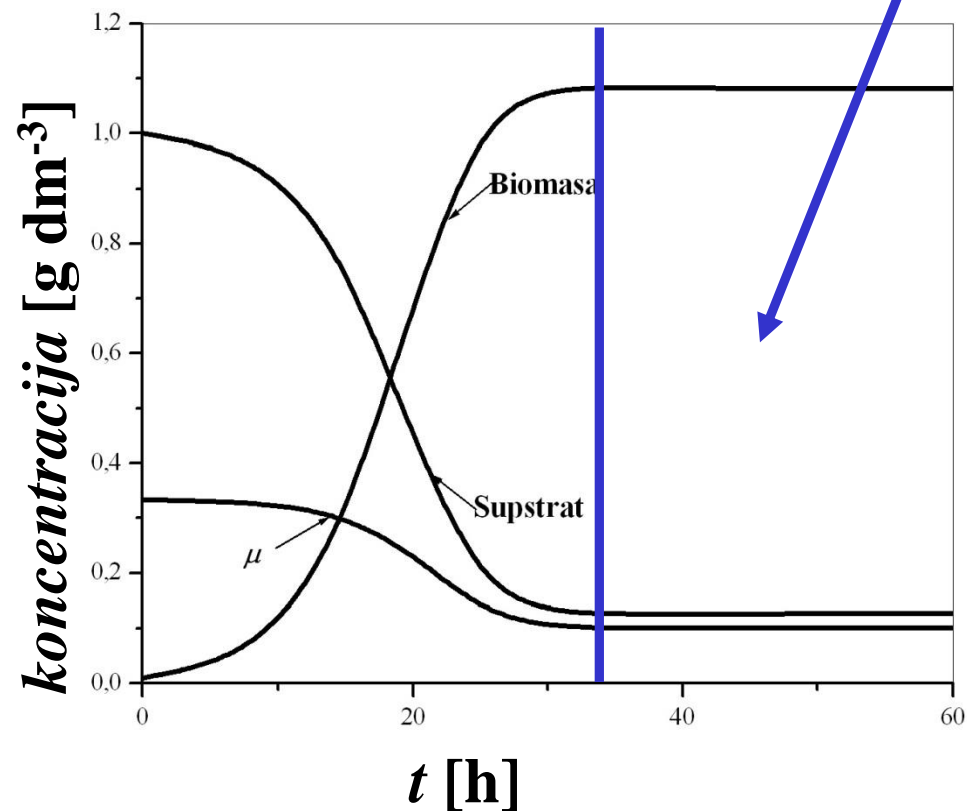
$$\mu = \frac{Y_{X/S}}{X_1} \cdot D \cdot (S_0 - S)$$



# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase

Uspostava stacionarnog stanja

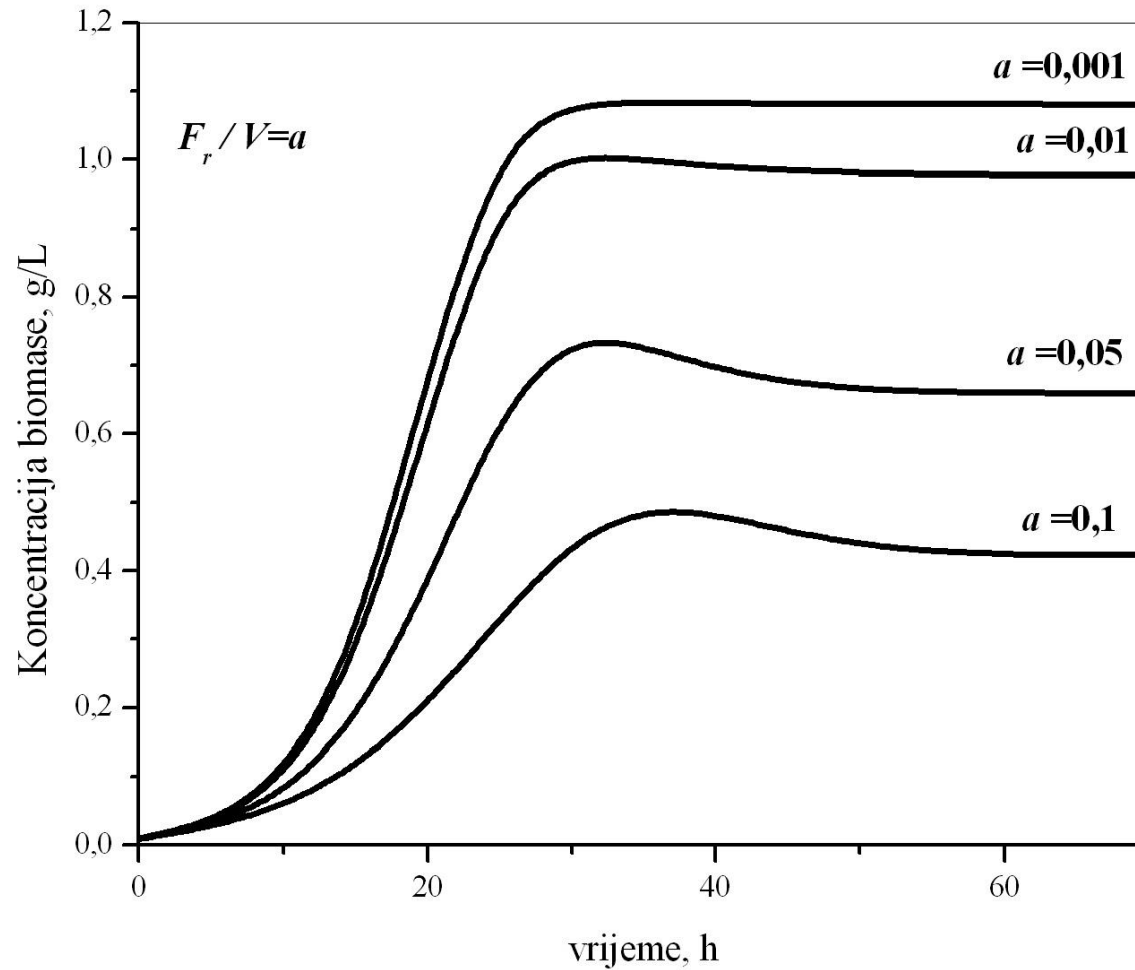
Parametar	Vrijednost
$D$ ( $\text{h}^{-1}$ )	0,1
$m_{\max}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	0,5
$K_S$ (g/L)	0,5
$Y_{X/S}$ (-)	0,8
$S_0$ (g/L)	1,0
$a$ ( $\text{h}^{-1}$ )	0,001



Na simulaciji se vidi da se nakon nekog vremena uspostavlja stacionarno stanje u reaktoru koje je karakterizirano konstantnom vrijednosti procesnih varijabli (koncentracija supstrata i biomase, te specifične brzine rasta biomase). Da bi mogli prikazati ovakvu simulaciju neophodan nam je matematički model procesa, te vrijednosti parametara modela.



# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase



# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase-Otpadna voda

## Bilanca biomase:

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

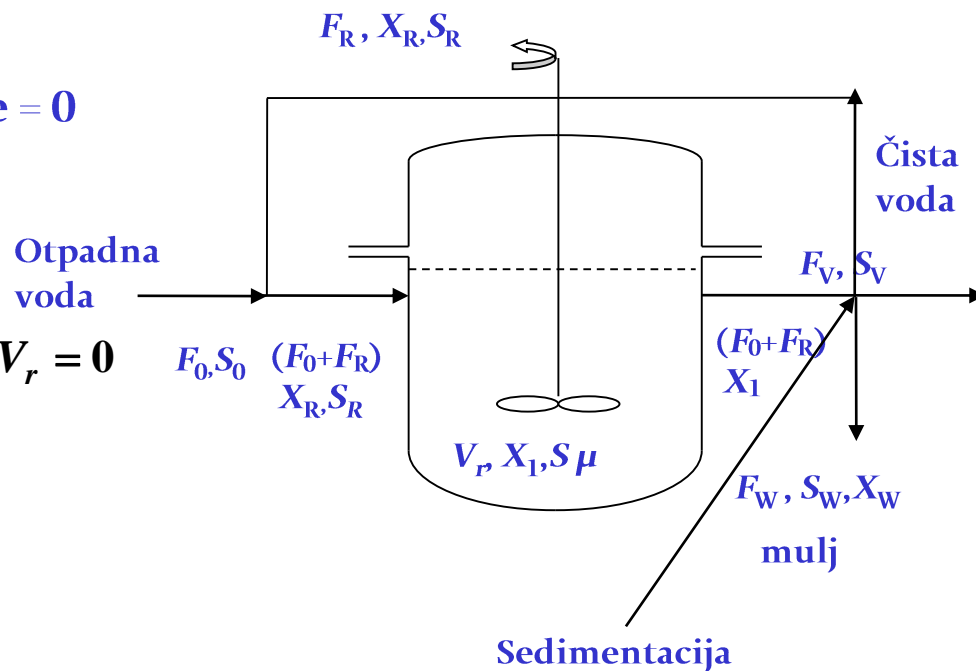
Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_0 \cdot X_0 + F_R \cdot X_R - (F_0 + F_R) \cdot X_1 + \mu \cdot X_1 \cdot V_r = 0$$

$$F_0 \cdot X_0 = 0; F_V \cdot X_V = 0$$

$$(F_0 + F_R) \cdot X_1 = F_R \cdot X_R + F_W \cdot X_W / : V_r$$

$$\mu \cdot X_1 = \frac{F_W}{V_r} \cdot X_W$$

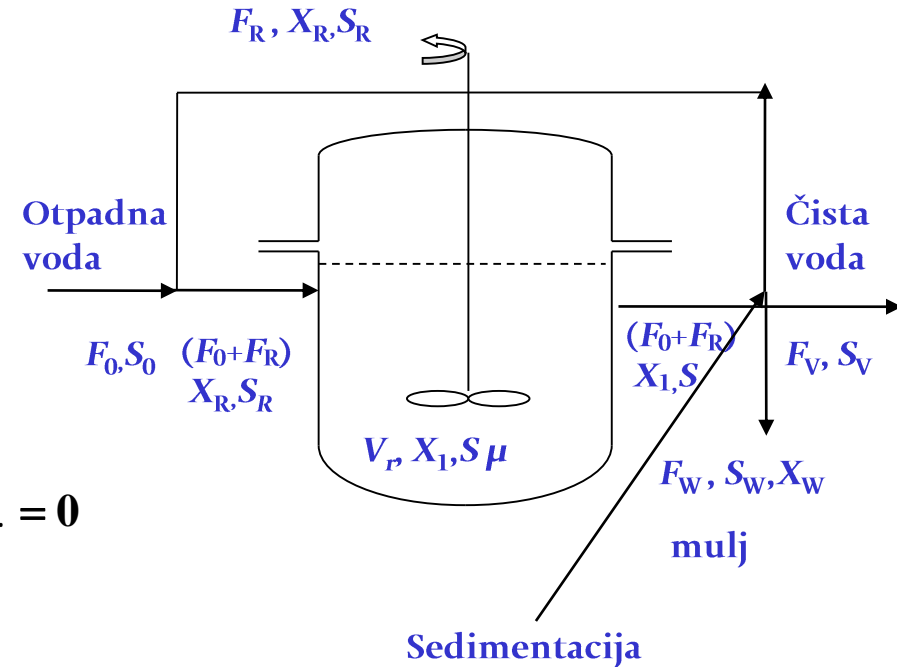


# Protočni kotlasti bioreaktor s povratnim tokom biomase-Otpadna voda

## Bilanca supstrata:

Ulaz – Izlaz - Nastajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0



$$F_0 \cdot S_0 + F_R \cdot S_R - (F_0 + F_R) \cdot S - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1 \cdot V_r = 0$$

$$(F_0 + F_R) \cdot S = F_R \cdot S_R + F_V \cdot S_V + F_W \cdot S_W$$

$$F_0 \cdot S_0 + F_R \cdot S_R - F_R \cdot S_R - F_V \cdot S_V - F_W \cdot S_W - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1 \cdot V_r = 0 / : V_r$$

$$D \cdot S_0 - \frac{F_V}{V_r} \cdot S_V - \frac{F_W}{V_r} \cdot S_W = \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X_1$$

# Kotlasti bioreaktor s dotokom supstrata – eng. fed batch

Ulaz – Izlaz + Nastajanje = Akumulacija

Nestacionaran proces: Brzina akumulacije  $\neq 0$

Bilanca biomase:

$$\mu \cdot X \cdot V = \frac{d(X \cdot V)}{dt}$$

$$\mu \cdot X \cdot V = \frac{dX}{dt} \cdot V + \frac{dV}{dt} \cdot X$$

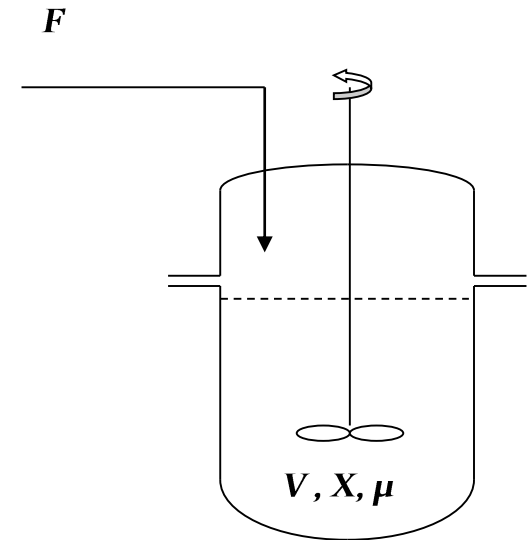
$$\frac{dV}{dt} = F$$

$$\mu \cdot X = \frac{dX}{dt} + F \cdot X$$

$$\mu = \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} + \frac{F}{V}$$

$$\frac{F}{V} = D$$

$$D = \mu - \frac{1}{X} \frac{dX}{dt}$$



U mnogo slučajeva u industriji - proizvodnja pekarskog kvasca, proizvodnja antibiotika procesi se vode u polukontinuiranom reaktoru. Supstrat se kontinuirano dovodi u reaktor, a nema izlaznog toka pa se volumen kontinuirano povećava. Ovakav je tip reaktora odličan izbor ukoliko je reakcija koja se provodi inhibirana visokom koncentracijom supstrata.

Objašnjenje pojma inhibicije: Kod pripreme marmelade se stavlja puno šećera koji služi i kao konzervans. Mikroorganizmima šećer služi kao hrana, ali ako ga dodamo puno, mikroorganizmi se neće razvijati – inhibirani su.

# Kotlasti bioreaktor s dotokom supstrata – Fed batch

Ulaz – Izlaz - Nastajanje = Akumulacija

Nestacionaran proces: Brzina akumulacije  $\neq 0$

**Bilanca supstrata:**

$$F \cdot S_0 - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X \cdot V_r = \frac{d(S \cdot V_r)}{dt}$$

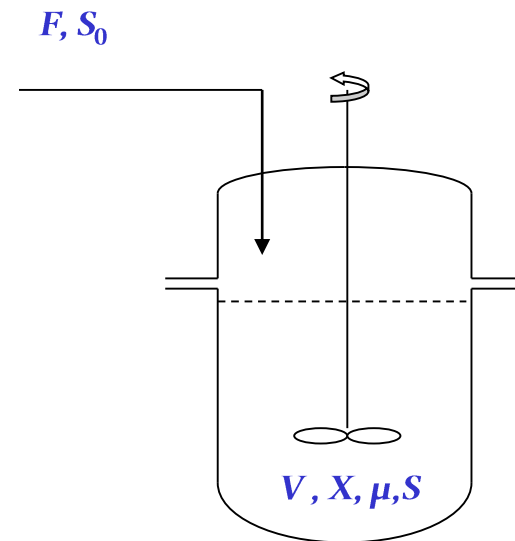
$$F \cdot S_0 - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X \cdot V_r = \frac{dS}{dt} \cdot V_r + \frac{dV_r}{dt} \cdot S$$

$$\frac{dV_r}{dt} = F$$

$$\frac{F}{V_r} \cdot S_0 - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X = \frac{dS}{dt} + \frac{F}{V_r} \cdot S$$

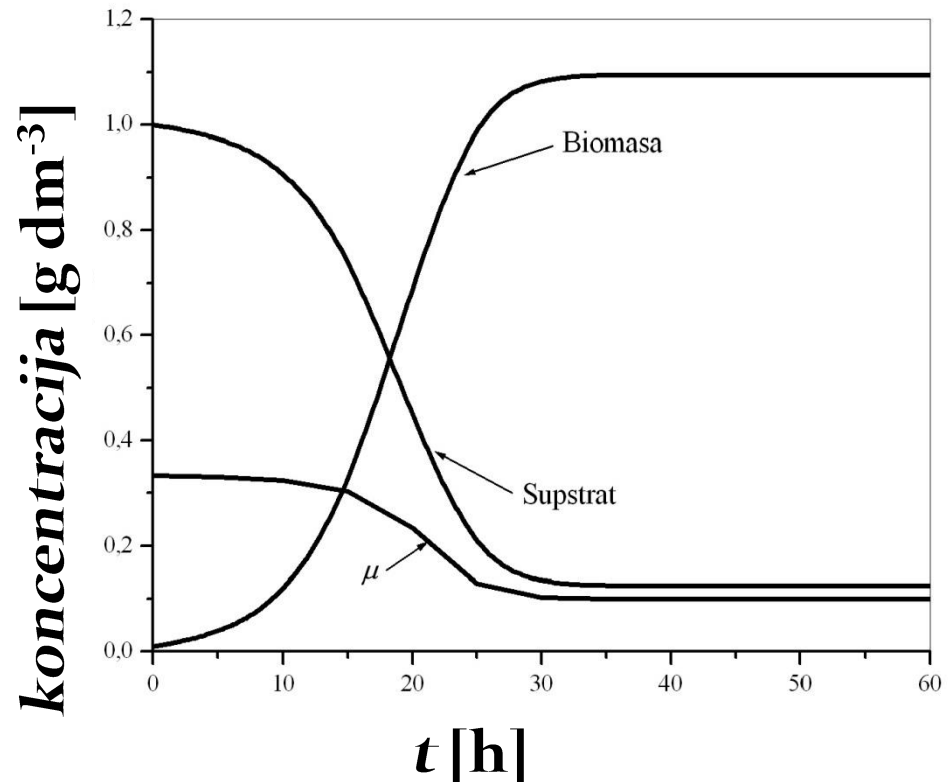
$$\frac{F}{V_r} = D$$

$$\frac{dS}{dt} = D \cdot (S_0 - S) - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot X$$



# Kotlasti bioreaktor s dotokom supstrata – eng. fed batch

Parametar	Vrijednost
$D$ (h <sup>-1</sup> )	0,1
$\mu_{\max}$ (h <sup>-1</sup> )	0,5
$K_S$ (g/L)	0,5
$Y_{X/S}$ (-)	0,8
$S_0$ (g/L)	1,0



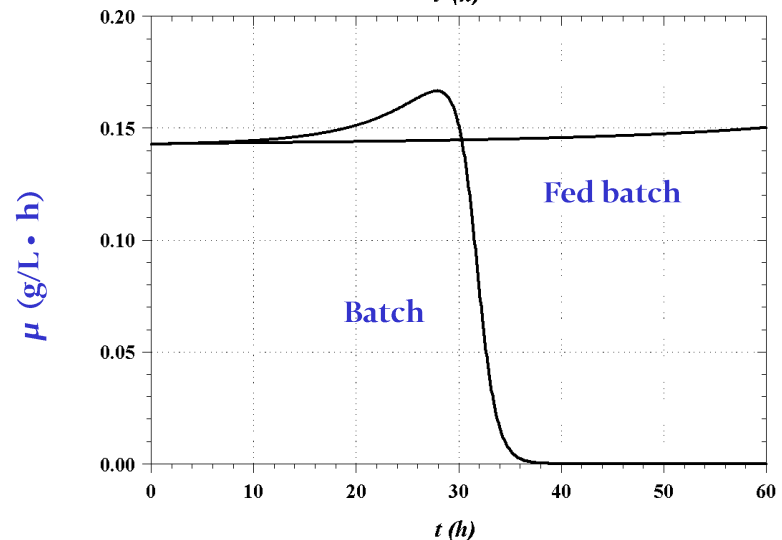
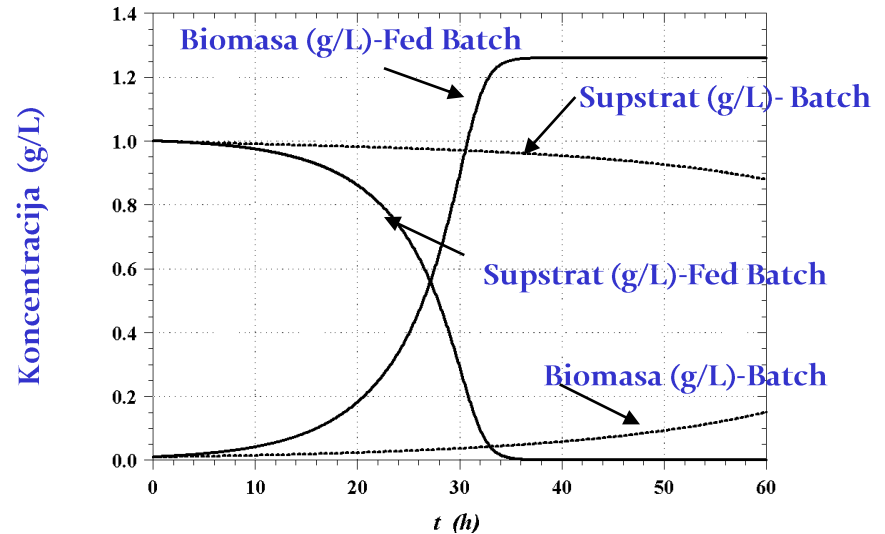
Ovaj način upravljanja omogućava održavanje koncentracije supstrata na određenoj koncentraciji.

Npr. previsoka koncentracija glukoze pri proizvodnji kvasca rezultira nastankom etanola i time smanjuje rast stanica. Polaganim dodavanjem glukoze u reaktor se postiže da se sva glukoza potroši čime se postiže maksimalno iskorištenje u pretvorbi glukoze u nove stanice.

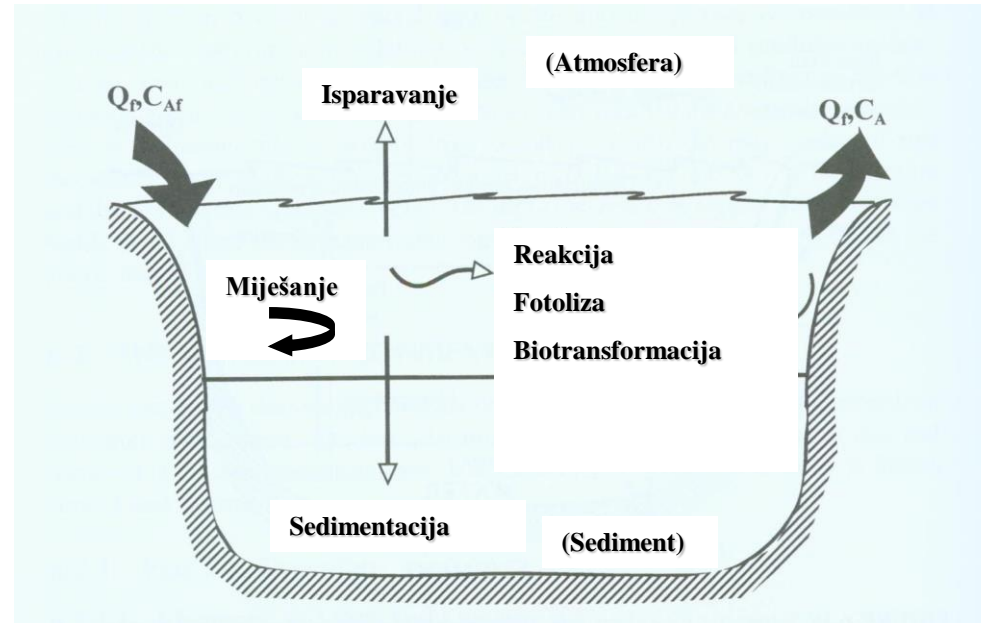
# Kotlasti bioreaktor s dotokom supstrata – Fed batch

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

Parametar	Vrijednost
$D (h^{-1})$	0,1
$m_{max} (h^{-1})$	0,5
$K_S (g/L)$	0,5
$Y_{X/S} (-)$	0,8
$S_0 (g/L)$	1,0



# Protočni kotlasti bioreaktor

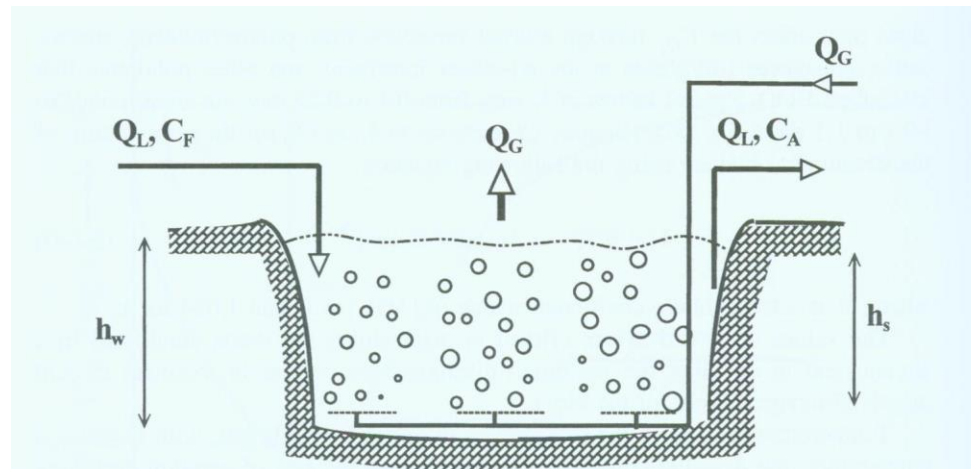


## Model jezera

$$Q_f C_{Af} - Q_f C_A - r_A V_e = \frac{dC_A}{dt} V_e$$



# Protoční kotlasti bioreaktor

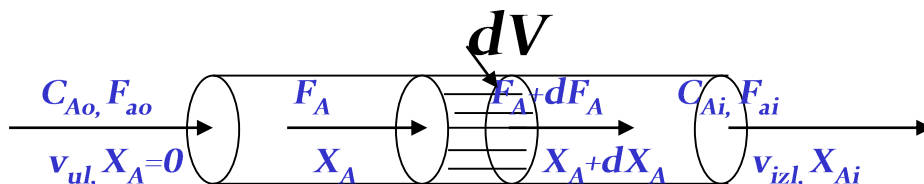


## Model lagune za odpadnu vodu

$$V_b \frac{dC_A}{dt} = K \cdot A_b (C_A - C_{Aeq})$$

# Idealni cijevni reaktor

eng. plug flow reactor

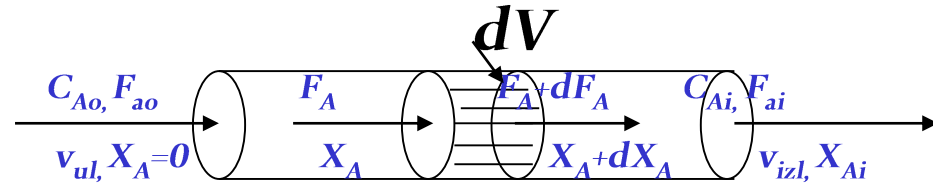


Fluid prolazi kroz cijevni reaktor bez međusobnog miješanja s fluidom koji je ušao prije – **idealnim strujanjem**. Idealni cijevni reaktor radi u stacionarnom stanju, što znači da se procesne varijable ne mijenjaju s vremenom. Temperatura unutar reaktora je konstantna, te nema promjene volumena i gustoće reakcijske smjese. Procesne varijable (koncentracija, brzina reakcije) se mijenjaju duž duljine reaktora (osi  $z$ ), pa se bilance tvari postavljaju za diferencijalni volumen. Radi se o **diferencijalnoj bilanci tvari**.

# Cijevni reaktor

Bilanca tvari za reaktant A:

Ulaz – Izlaz - Nestajanje = Akumulacija



Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$F_A - (F_A + dF_A) + (-r_A) \cdot dV = 0 \quad (1)$$

odnosno

$$F_{Ao} \cdot dX_A = (-r_A) \cdot dV \quad (2)$$

Kako je  $F_{Ao} = C_{Ao} \cdot v_{ul}$  (3)

to je:

$$V = C_{Ao} \cdot v_{ul} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)} \quad (4)$$

odnosno vrijeme zadržavanja je:

$$\tau = \frac{V}{v_{ul}} = C_{Ao} \cdot \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)} = - \int_{C_{Ao}}^{C_A} \frac{dC_A}{(-r_A)} \quad (5)$$

Navedeni nam model (bilanca tvari u cijevnom reaktoru) uz poznati kinetički model omogućava simulacije.

# Cijevni reaktor

## Bilanca tvari za reaktant A:

Ulaz – Izlaz - Nestajanje = Akumulacija

Stacionaran proces: Brzina akumulacije = 0

$$dx_A = -\frac{dC_A}{C_{Ao}}$$

$$F_{Ao} = C_{Ao} \cdot v_{ul}$$

$$dV = dx \cdot r^2 \pi$$

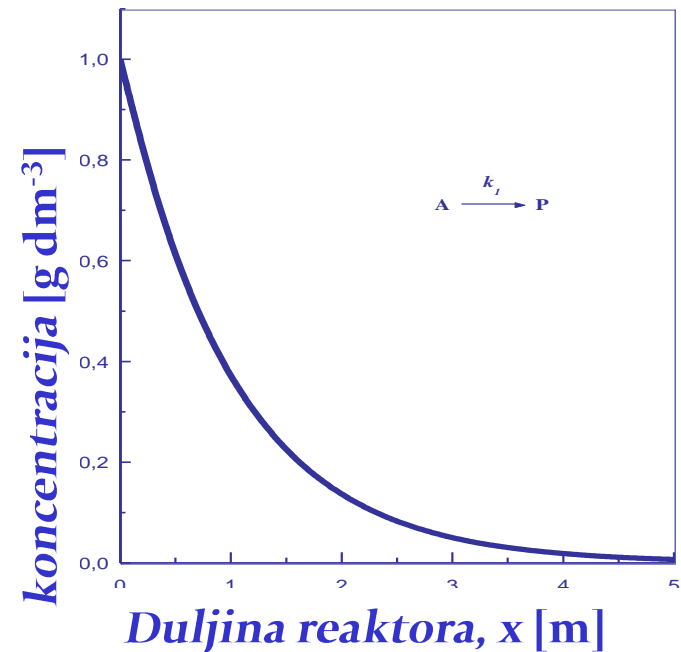
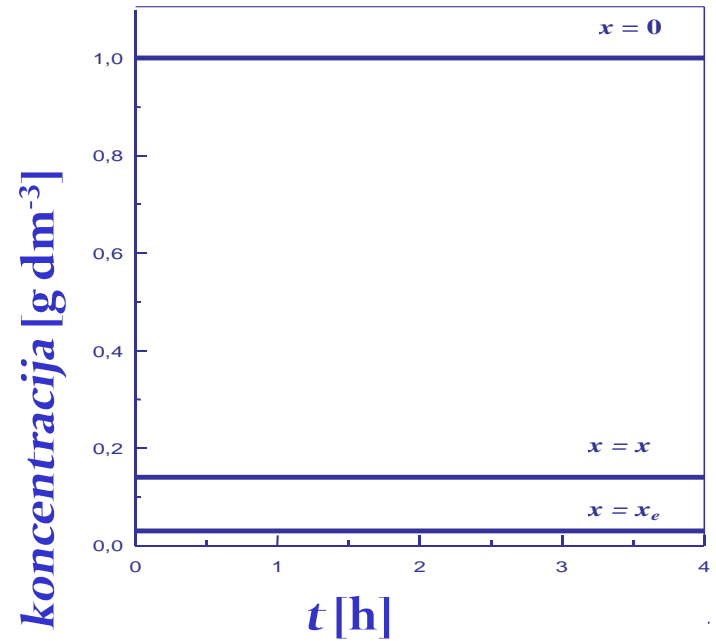
$$\frac{dC_A}{dx} = -\frac{r^2 \pi}{v_{ul}} \cdot k_1 \cdot C_A$$

Reakcija I reda

$$(-r_A) = -k_1 \cdot C_A$$

Parametar	Vrijednost
$C_{Ao} [\text{mol L}^{-1}]$	1
$k_1 [\text{s}^{-1}]$	$2,78 \times 10^{-4}$
$(k_1 [\text{h}^{-1}])$	1
$r^2 \pi [\text{m}^2]$	1
$v_{ul} [\text{L h}^{-1}]$	1

$x$ [ m ]	$C_A$ [ mol L <sup>-1</sup> ]
0	1,000
0,25	0,778
0,5	0,606
0,75	0,472
1	0,367
1,5	0,223
2	0,135
2,5	0,082
3	0,049
3,5	0,030
4	0,018
4,5	0,011
5	0,006



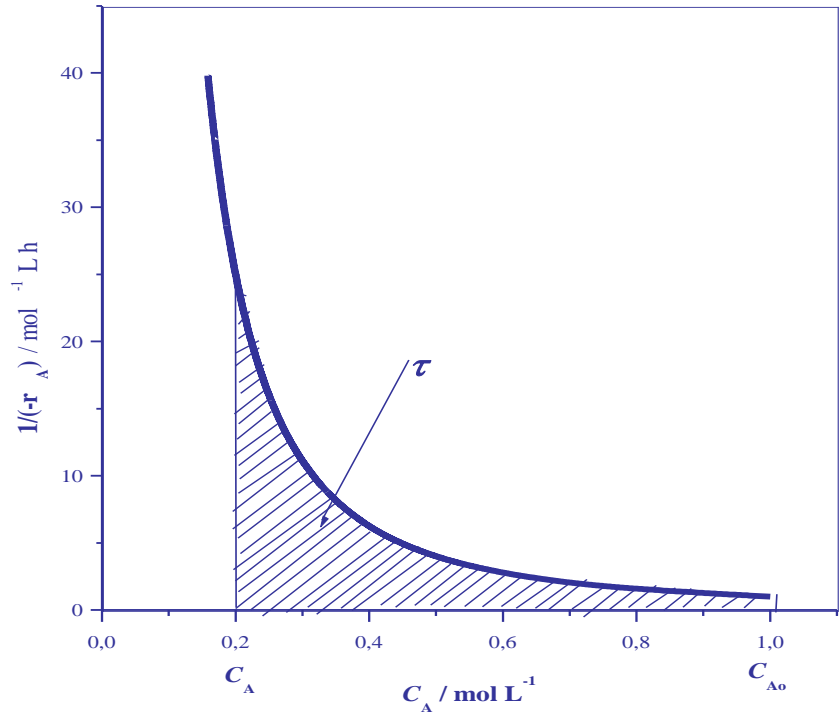
# Cijevni reaktor

Simulacije prikazane na prethodnom slide-u nam pokazuju da koncentracija u cijevnom reaktoru ne ovisi o vremenu što je i pretpostavka stacionarnog stanja. Koncentracijski profil se mijenja po duljini reaktora, što se vidi iz druge slike na prethodnom slide-u. Koncentracija se također mijenja promjenom vremena zadržavanja u reaktoru, tj. promjenom protoka reakcijske otopine.

Vrijeme zadržavanja:

$$\tau = \frac{V}{v_{ul}} = C_{Ao} \cdot \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)} = - \int_{C_{Ao}}^{C_A} \frac{dC_A}{(-r_A)}$$

Vrijeme zadržavanja u cijevnom reaktoru se može izračunati i kao površina ispod krivulje kao što je prikazano na slici desno – što proizlazi direktno iz bilance tvari u cijevnom reaktoru prikazane iznad.

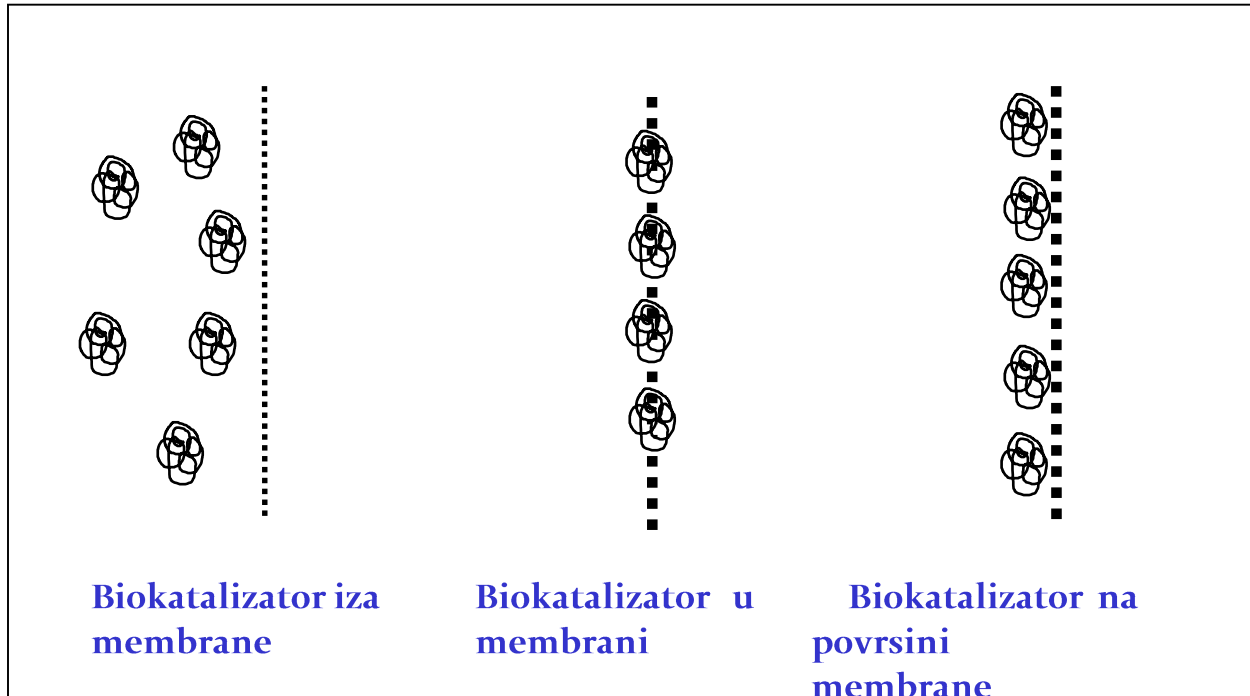


# Membranski reaktor

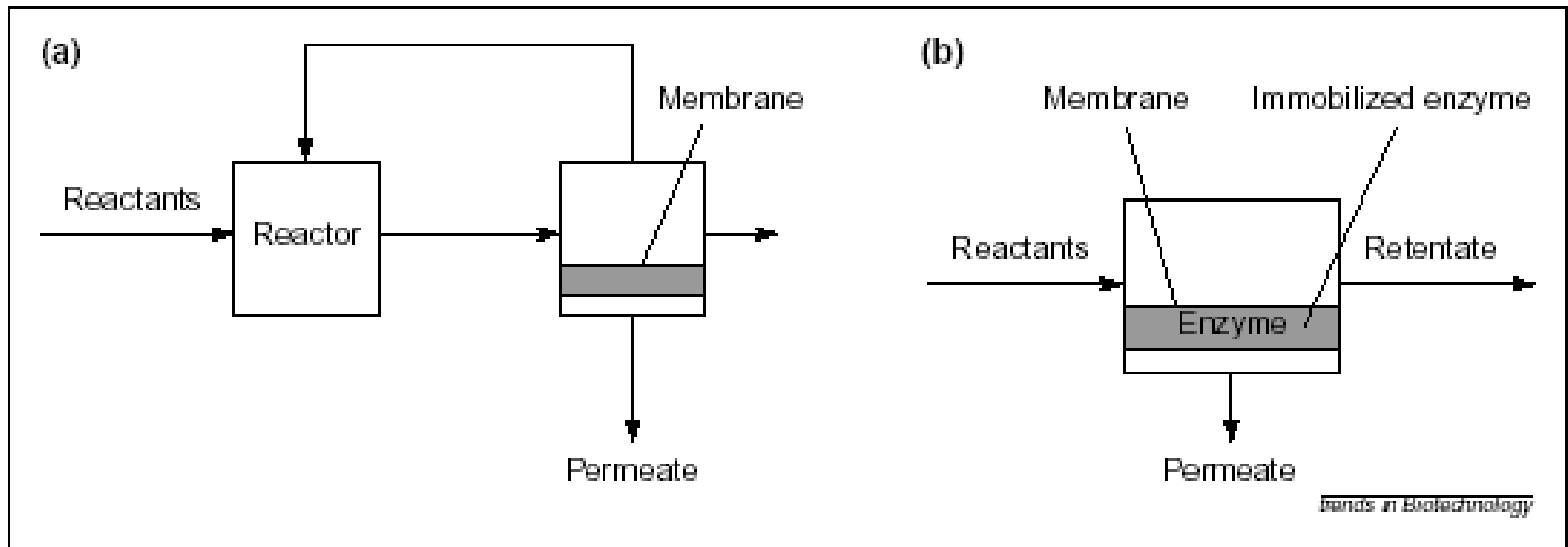
Membranski bioreaktori se mogu široko definirati kao integrirani sustavi bioprocasa (biotransformacije ili biosinteze ili biorazgradnje) s membranskom filtracijom.

Biokatalizatori ili mikroorganizmi se u membranskom bioreaktoru mogu zadržati iza membrane, u membrani ili se vezati na površinu membrane.

# Membranski reaktor



# Membranski reaktor



(a)

Procesna shema membranskog reaktora s vanjskom separacijskom jedinicom

(b)

Procesna shema integriranog membranskog reaktora



# Enzimski membranski reaktor

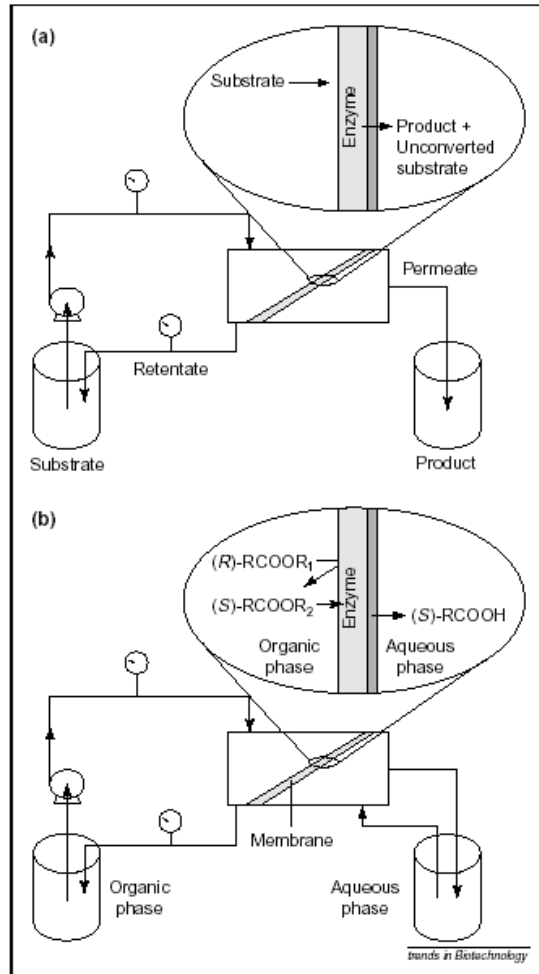
## *Ultrafiltracijski membranski reaktor*

- Topljivo imobilizirani enzim
- Homogeno raspodjeljen biokatalizator
- Homogena biokataliza
- Dobra radna stabilnost

## *Membranski reaktor*

- Netopljivo imobiliziran enzima
- Biokatalizator imobiliziran u membrani
- Heterogena biokataliza
- Ograničenja zbog prijenosa tvari difuzijom

# Enzimski membranski reaktor

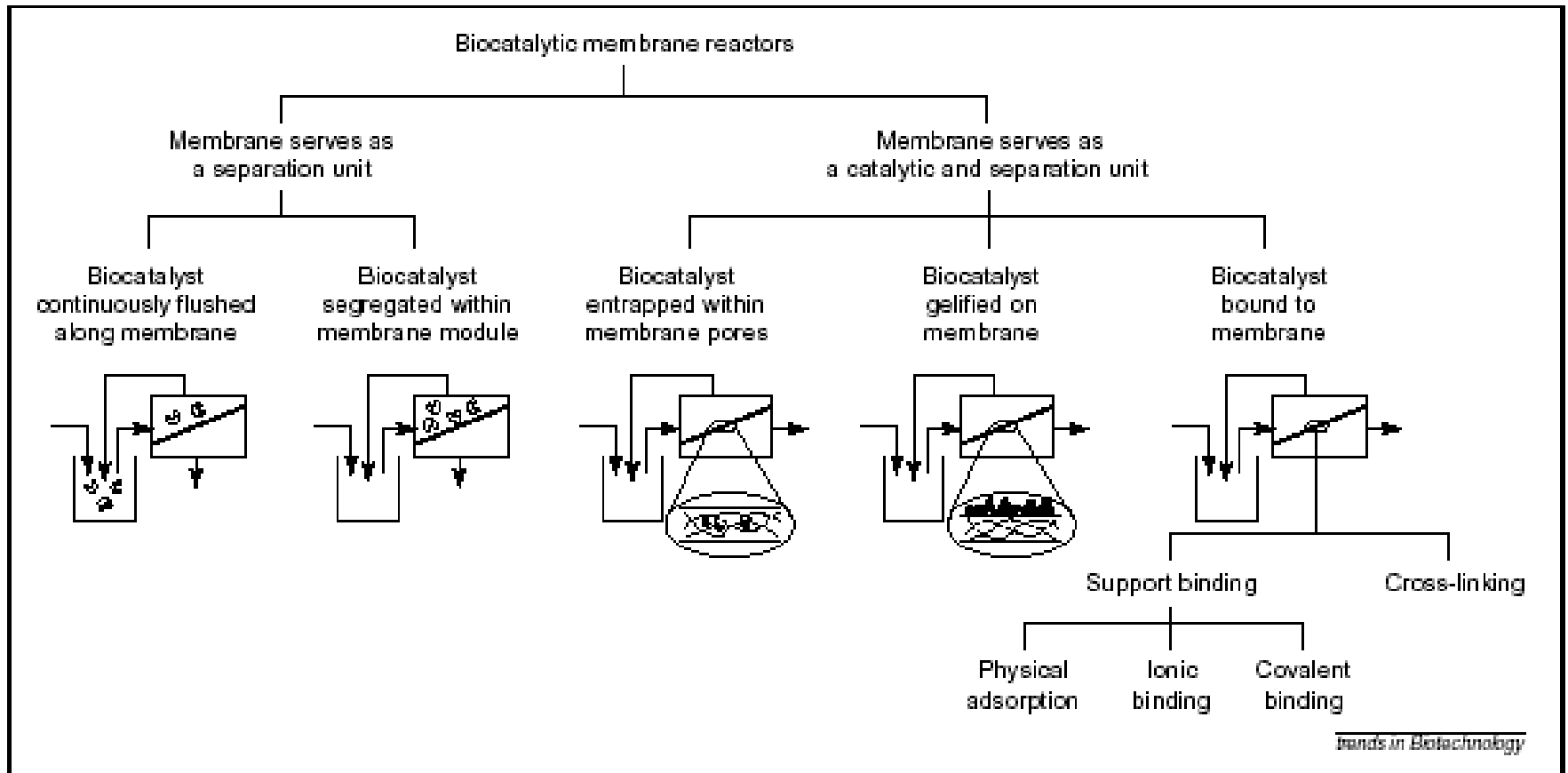


Shematski prikaz transportnog mehanizma kroz membranu

a) Ultrafiltracijski membranski reaktor

b) Membranski reaktor

# Enzimski membranski reaktor

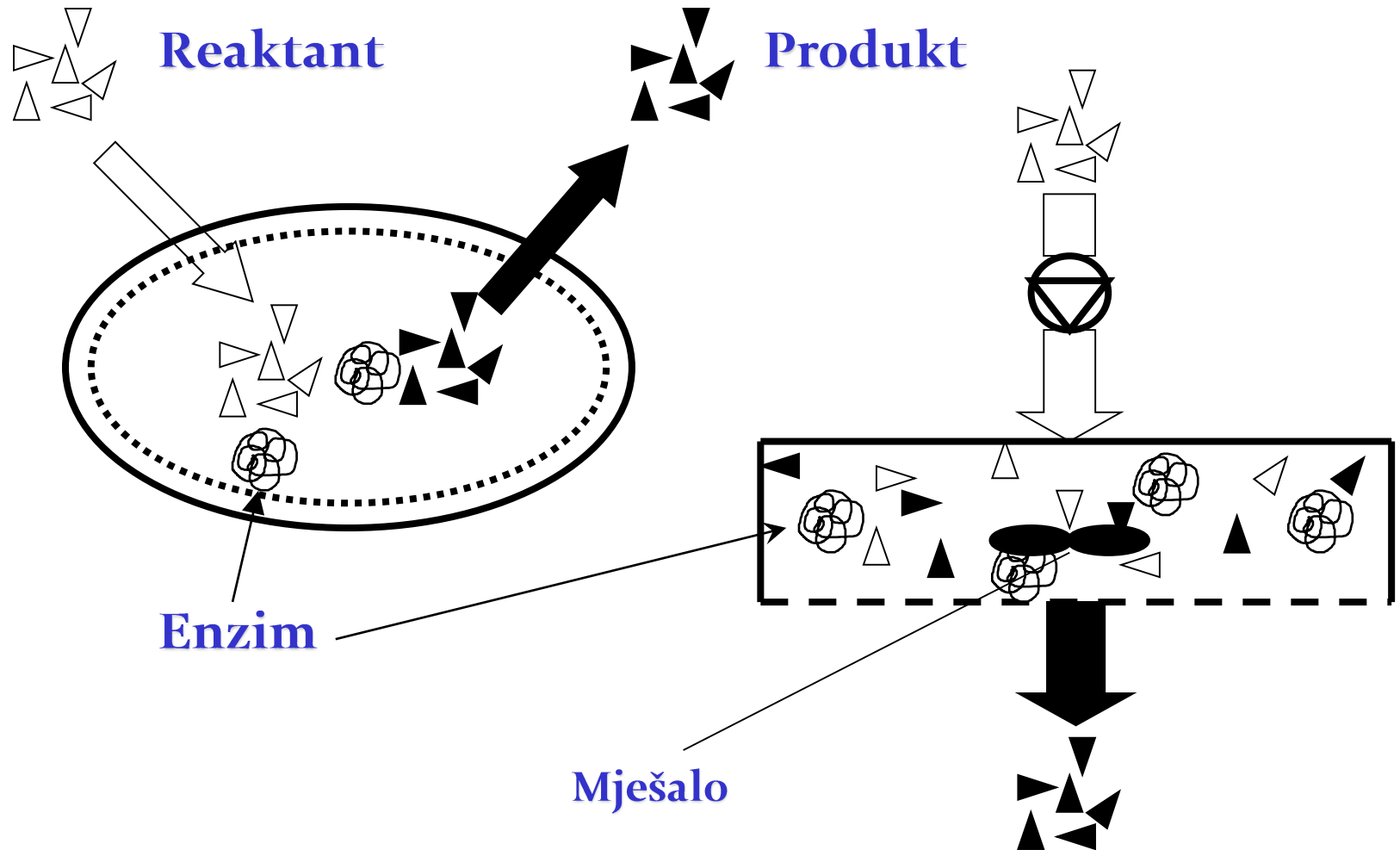


# Ultrafiltracijski membranski reaktor

Ako su biokatalizatori zadržani iza membrane govori se o *ultrafiltracijskom membranskom reaktoru*

Temelj ovog bioreaktora je da postoji dovoljna razlika u veličini između molekula biokatalizatora i molekula produkta. Molekule biokatalizatora unutar bioreaktora zadržava pogodna membrana, a molekule produkta tjerane tlakom, (prisilna konvekcija) prolaze kroz membranu.

# Ultrafiltracijski membranski reaktor



# Ultrafiltracijski membranski reaktor

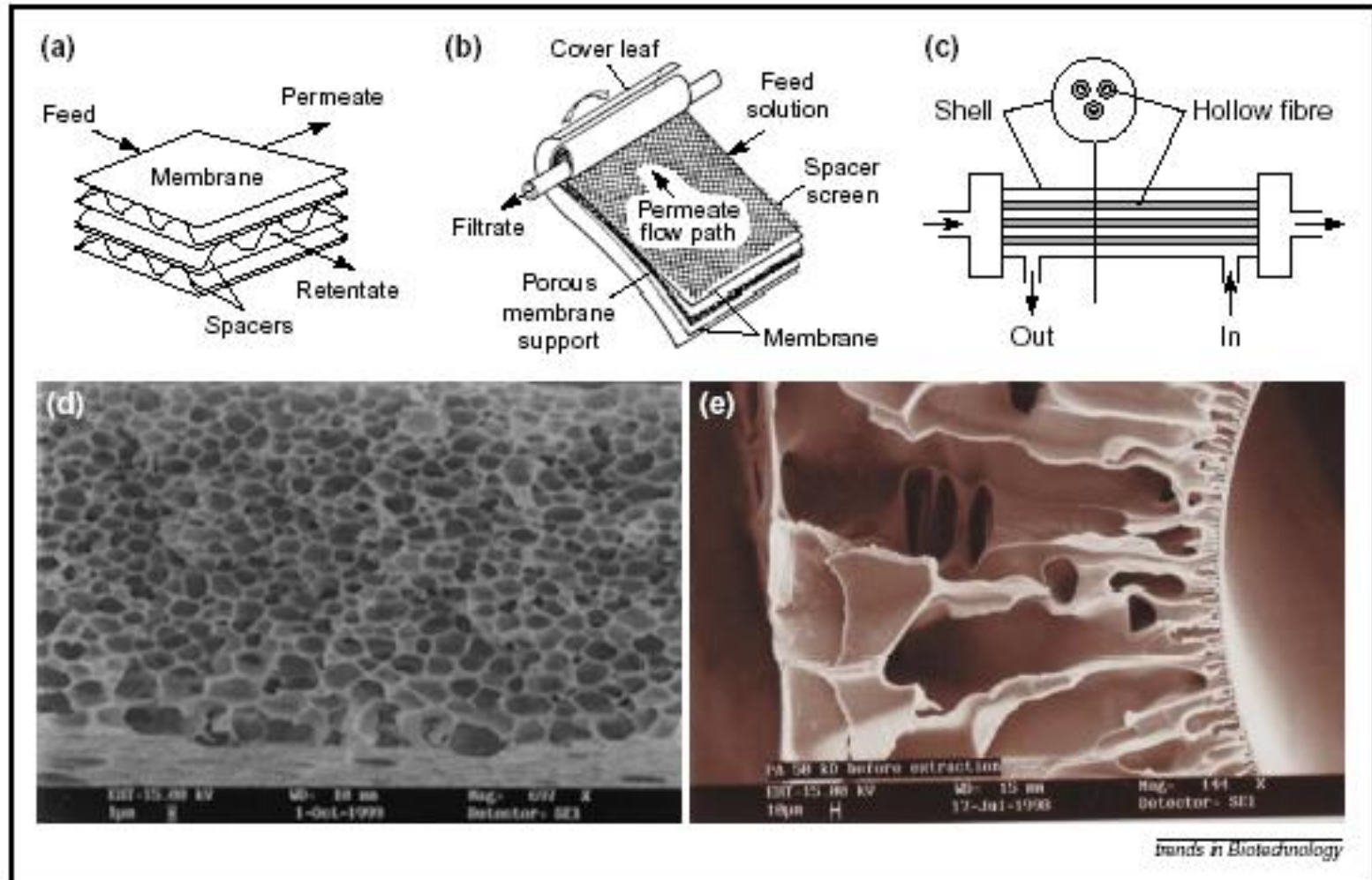
## Značajke:

- Tehnički uređaj koji oponaša prirodu
- Homogena biokataliza
- Nema utjecaja otpora prijenosu tvari
- Moguć kontinuirani rad
- Stalna aktivnost enzima
- Može raditi kao idealni protočni kotlasti reaktor

# Tipovi membrana u ultrafiltracijskom membranskom reaktoru

- ultrafiltracijska membrana
- nabijena ultrafiltracijska membrana
- hidrofobna membrana
- porozna membrana
- tekuće membrane

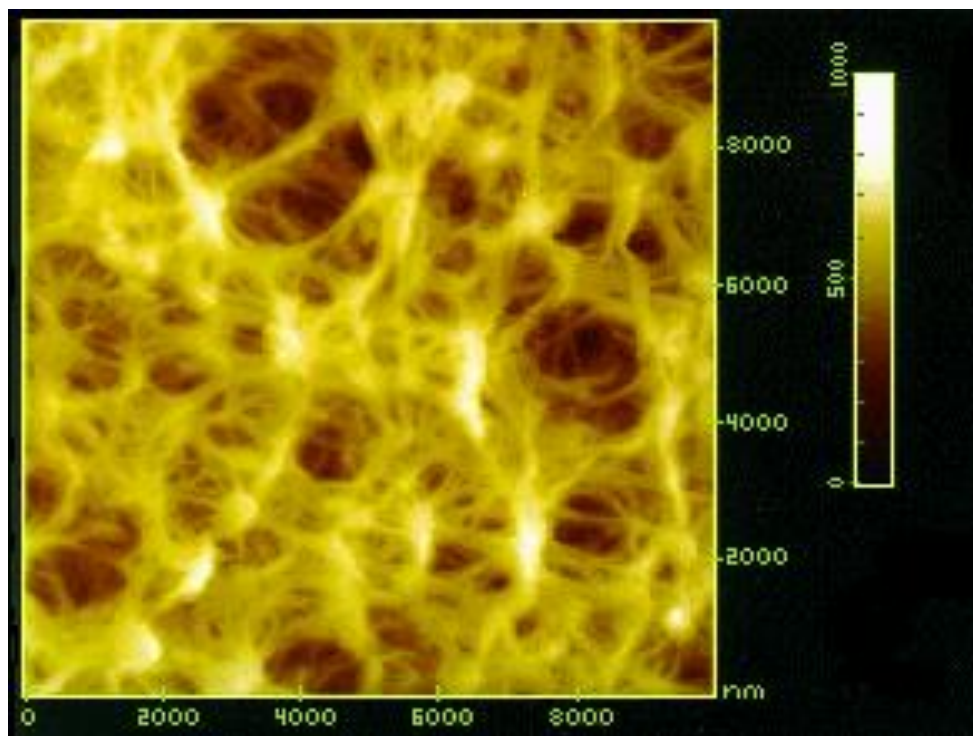
# Tipovi membrana u ultrafiltracijskom membranskom reaktoru





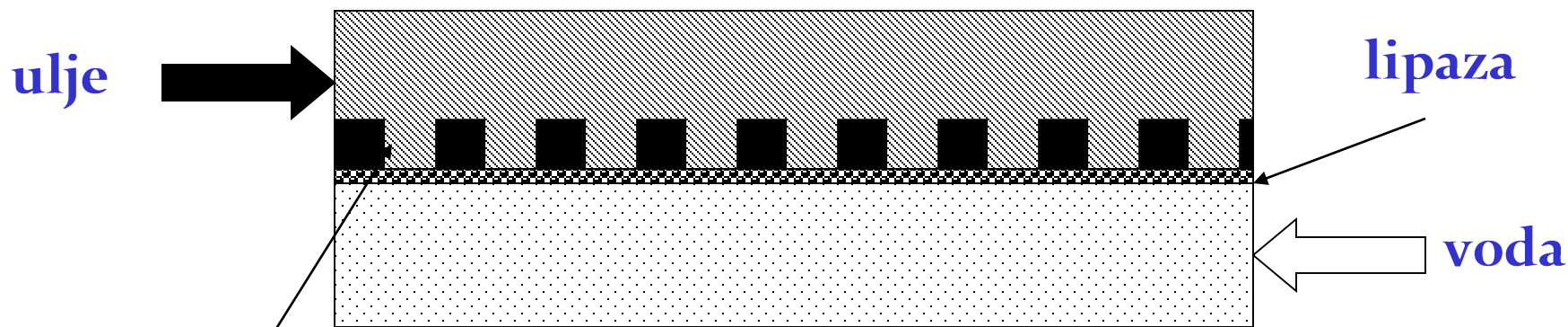
# Tipovi membrana u ultrafiltracijskom membranskom reaktoru

## *Ultrafiltracijska membrana*



# Tipovi membrana u ultrafiltracijskom membranskom reaktoru

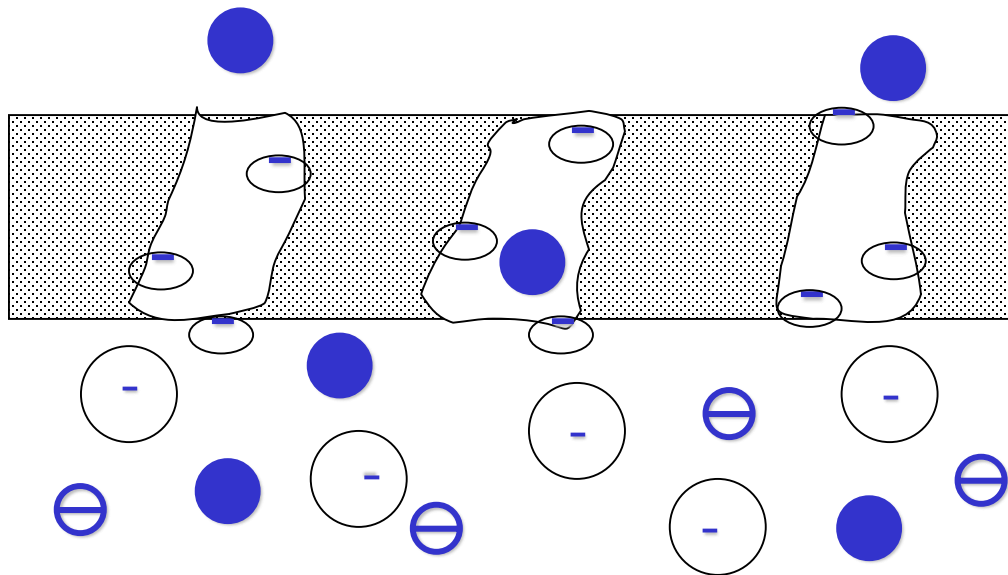
## *Hidrofobna membrana*



Mikroporozna polipropilenska membrana-hidrofobna

# Tipovi membrana u ultrafiltracijskom membranskom reaktoru

## *Nabijena ultrafiltracijska membrana*



$\ominus$  - reaktant      ● - produkt       $\ominus$  - biokatalizator

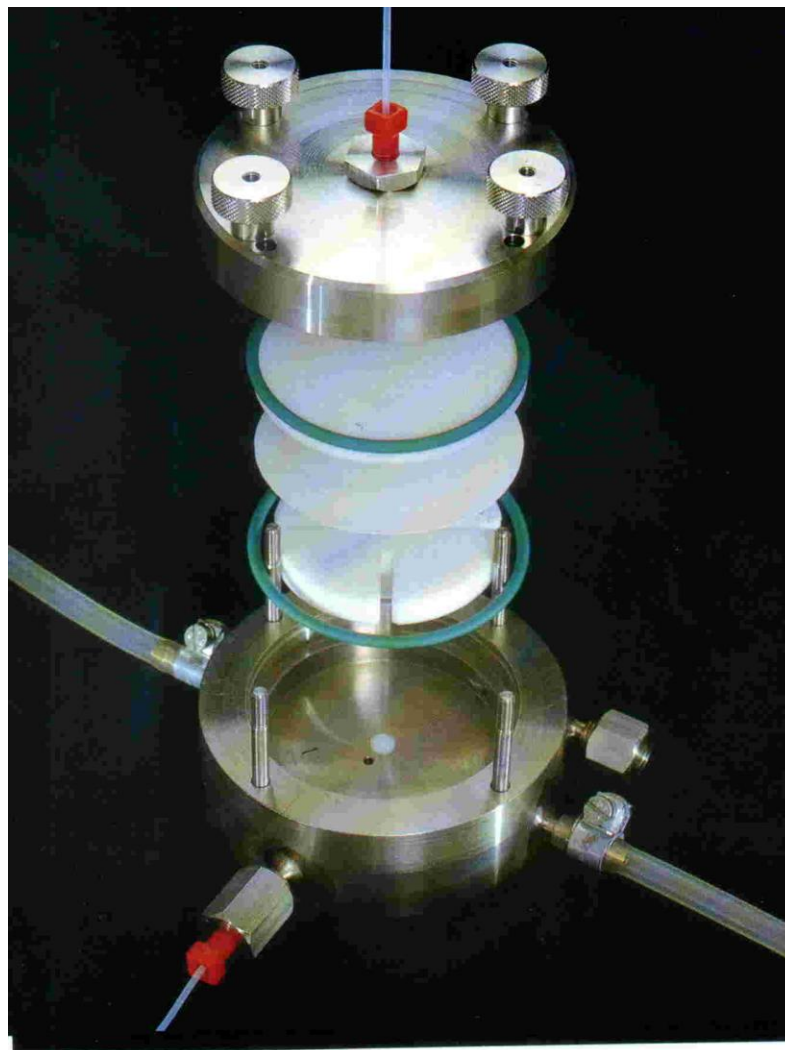
# Prednosti i nedostaci UMR-a

<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>-Nema otpora prijenosu tvari</li><li>-Visoka volumna produktivnost</li><li>-Nije potrebno provesti imobilizaciju</li><li>-Lako se sterilizira</li><li>-Jednostavno se dodaje svjež enzim</li><li>-Moguće je ostvariti konstantnu volumnu produktivnost</li><li>-Dobije se ultrafiltrirani produkt</li><li>-Moguća je kontinuirana regeneracija koenzima</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Potrebna je filtracija supstrata</li><li>-Viši investicijski troškovi u usporedbi s kolonskim reaktorom</li><li>-Manja stabilnost enzima u odnosu na imobilizirane enzime</li><li>-Uvjeti reaktora s idealnim istiskivanjem su mogući samo u kaskadi membranskih reaktora</li></ul>

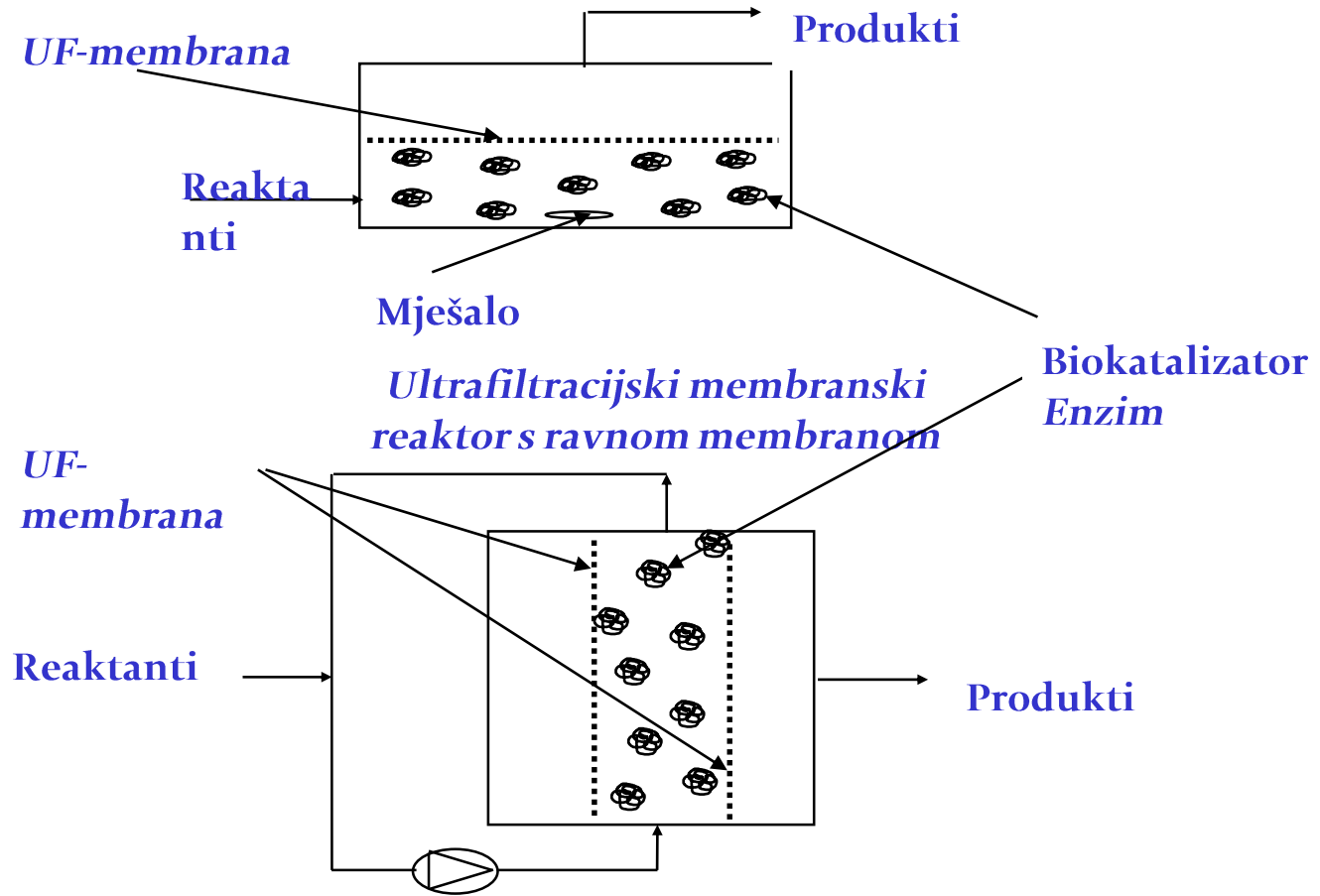
# Usporedba procesa s topljivim i imobiliziranim enzimima

Kriterij usporedbe	Proces s imobiliziranim enzimima	Proces s topljivim enzimima
<u>Financiranje</u> Kapital	Potrebna visoka sredstva	Potrebna niža sredstva
<u>Razvoj</u> Patent Troškovi Iskustvo Tehnologija	Ovisan o trećoj skupini Niski Postoji Ograničeno se može dalje upotrijebiti	Nema treće skupine Visoki Postoji ograničeno Široko područje za daljnju uporabu
<u>Proizvodnja</u> Uvjeti Iskustvo Raspoloživost biokatalizatora Aktivnost biokatalizatora Djelotvornost biokatalizatora Stabilnost biokatalizatora Sterilnost Kontrola za stalnu produktivnost Čišćenje	Postoje u mnogim kompanijama Postoji Postoji do određenog stupnja Niska 10-50 % Visoka Teško ostvariva Teško ostvariva Teško ostvariva	Nova tehnologija Nema ga mnogo Postoje Visoka ≈100 % Srednja Jednostavno ostvariva Jednostavno ostvariva Jednostavno ostvariva
<u>Tržište</u> Određuje važnost produkta	Dostupno i postoji	Jednostavno dostupno i postoji

# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor



# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor



Ultrafiltracijski membranski reaktor sa snopom membrana «hollow fiber»

# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor





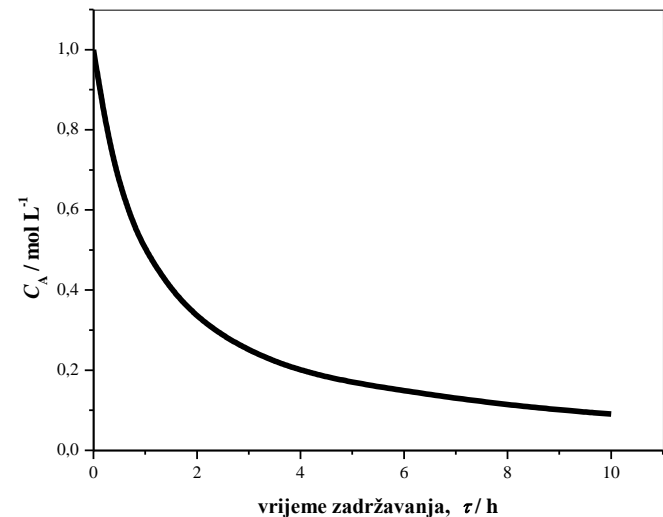
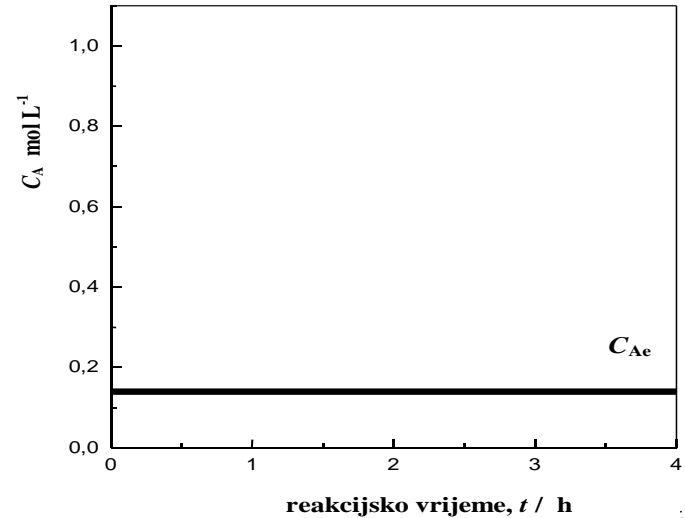
# Protočni kotlasti reaktor

Bilanca tvari za reaktant A:

$$\frac{C_{Ao} - C_A}{\tau} = (-r_A)$$

Enzimska reakcija

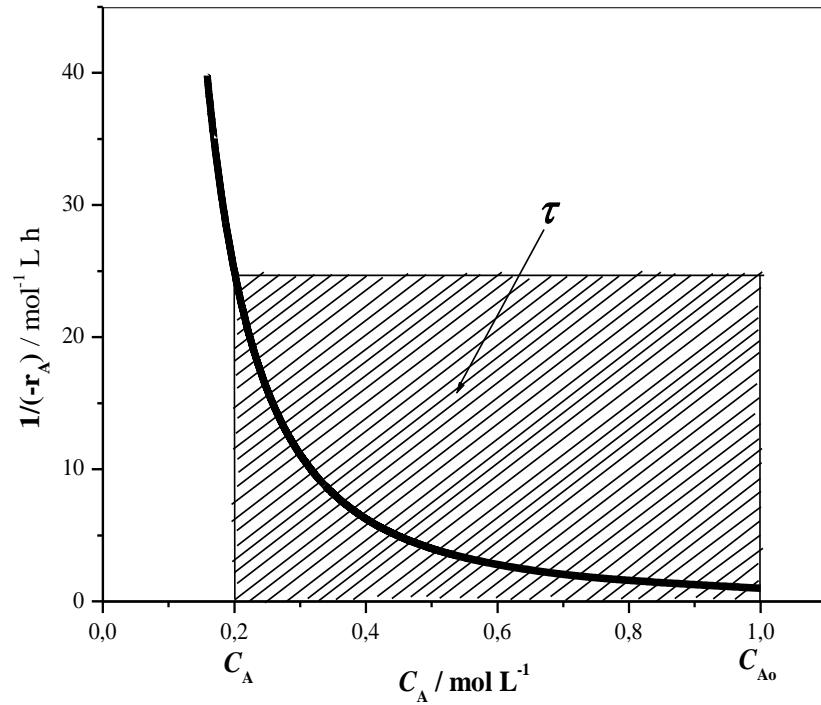
$$r_A = \frac{V_m \bullet c_A}{K_m + c_A}$$



# Protočni kotlasti reaktor

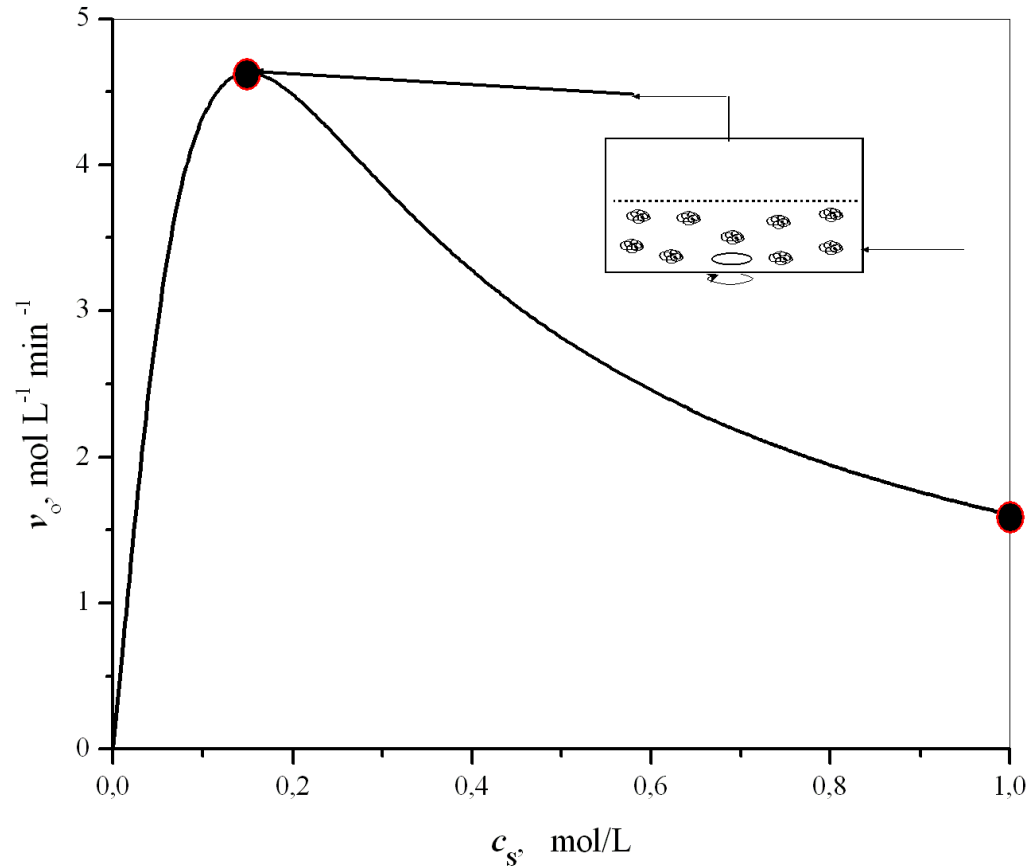
Vrijeme zadržavanja:

$$\tau = \frac{C_{Ao} - C_A}{(-r_A)}$$



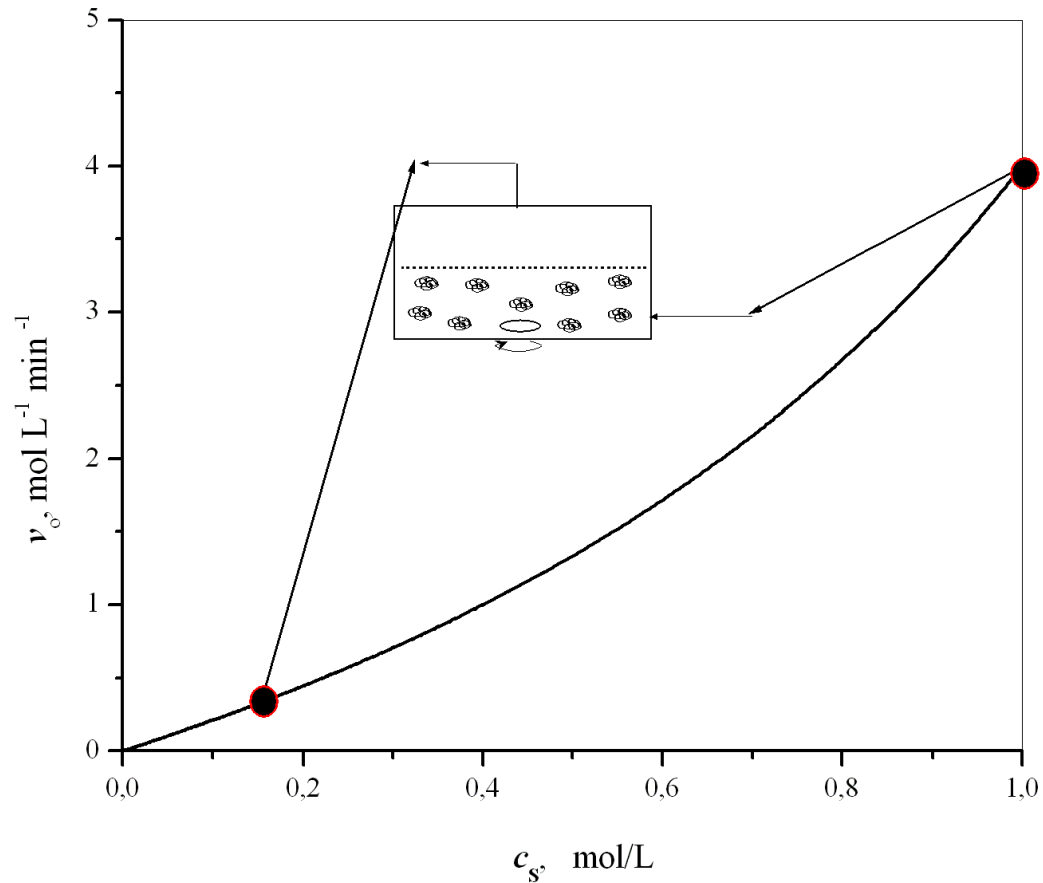
# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

Inhibicija supstratom:



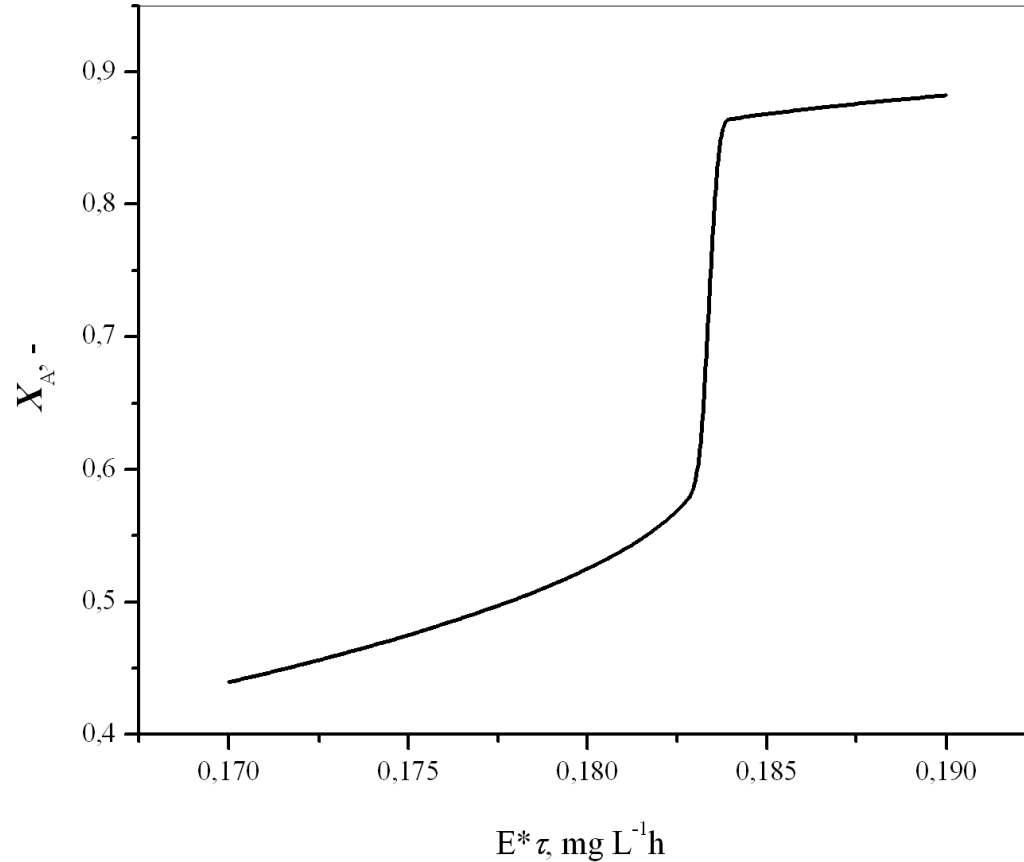
# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

Inhibicija produktom:



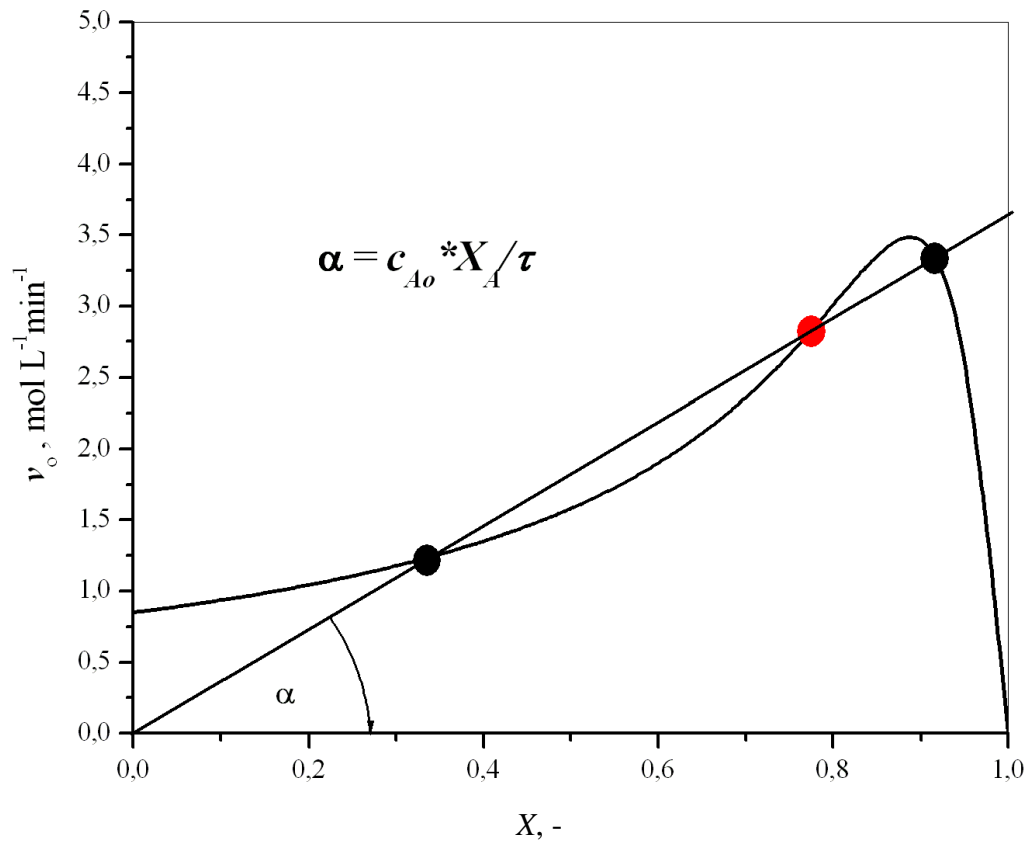
# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

Inhibicija supstratom:



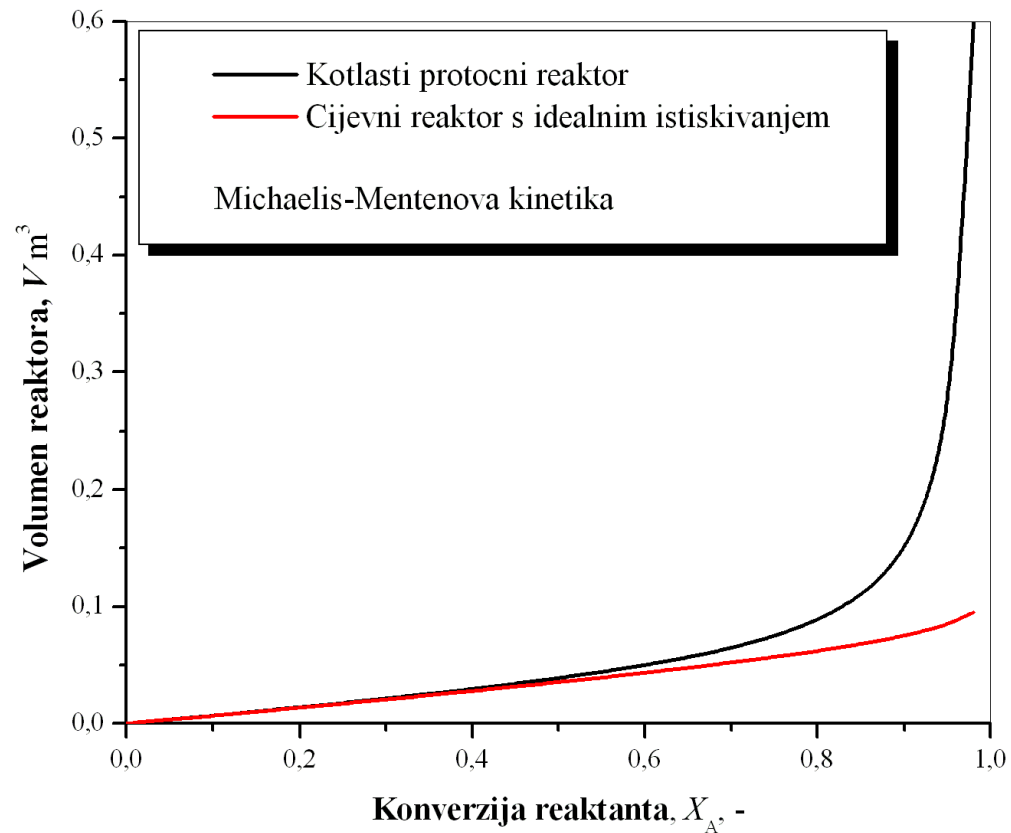
# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

## Inhibicija supstratom: Određivanje radnih točaka



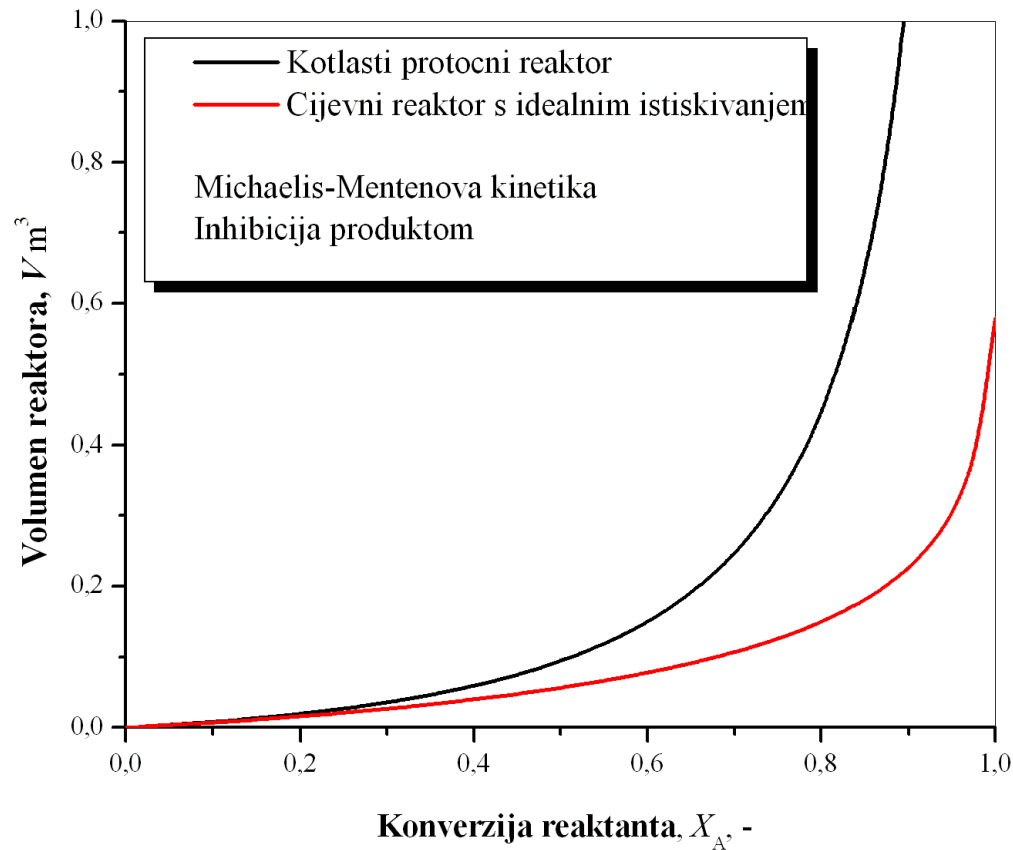
# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

Usporedba volumena kotlastog protočnog i cijevnog reaktora:



# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

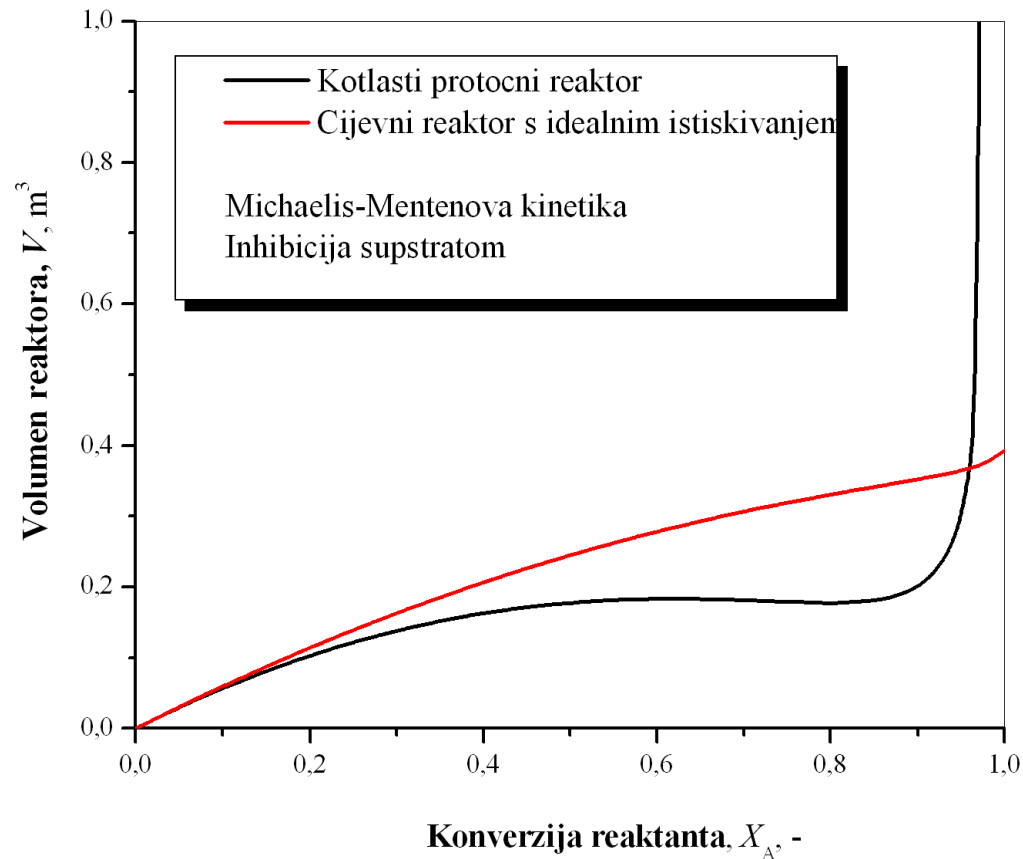
Usporedba volumena kotlastog protočnog i cijevnog reaktora:





# Enzimski ultrafiltracijski membranski reaktor

Usporedba volumena kotlastog protočnog i cijevnog reaktora:



# Volumna produktivnost

$$Q_p \text{ ( } mol \ m^{-3} \ s^{-1} \text{ )}$$

je prosječni proizvodni kapacitet u jediničnom volumenu bioreaktora i vremenu rada bioreaktora

# Volumna produktivnost

$$Q_P = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} -Y_{PS}^{uk} \bullet r_S \bullet dt$$

$t_r$  ( s ) = ukupno vrijeme rada bioreaktora

$r_S$  (  $mol\ m^{-3}\ s^{-1}$  ) = brzina reakcije (potrošnje supstrata)

$Y_{PS}^{uk}$  = ukupno iskorištenje na produktu  
(ukupni molovi produkta koji nastaju po ukupno  
potrošenim molovima supstrata)

$$Q_P = \frac{c_P}{t_r}$$

Kotlasti reaktor :

$$c_P = -Y_{P/S}^{uk} \bullet r_S \bullet t_b$$

Protocni kotlasti reaktor :

$$c_P = -Y_{P/S}^{uk} \bullet r_S \bullet \frac{V}{q_v}$$

# Volumna produktivnost

**Kotlasti reaktor:**

$$Q_P = \frac{c_{Ao} \bullet X_A}{E_o \bullet t_R}$$

$$t_R = t_{pu} + t_r + t_{pr}$$

$$t_r = - \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A}$$

# Volumna produktivnost

Protočni kotlasti reaktor:

$$Q_P = \frac{c_{A0} \cdot X_A}{E_o \cdot \tau}$$

$$\tau = \frac{c_{A0} \cdot X_A}{r_A}$$

Cijevni reaktor:

$$Q_P = \frac{c_{A0} \cdot X_A}{E_o \cdot \tau}$$

$$\tau = c_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A}$$

# Volumna produktivnost

(space-time yield)

$$STY = \frac{\text{Conversion} \bullet S_o \bullet M_p}{\tau} \quad [\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}]$$

$M_p$  – molarna masa produkta

$\tau$  prostorno vrijeme zadržavanja

# Volumna produktivnost

## Povećanje volumne produktivnosti bioprocasa:

- Minimiziranjem utjecaja koncentracije akumuliranog bioprodukta na stanice proizvođače ili na upotrebljen biokatalizator pri čemu dolazi do inhibicije brzine rasta i/ili biokatalitičke reakcije te do pojave negativnih fizičko-kemijskih utjecaja zbog promjene pH , promjene aktivnosti otapala ili povećanja viskoznosti.
- Minimiziranjem gubitaka na bioproduktu koji nastaju zbog nekontroliranog uklanjanja iz sustava.
- Smanjenjem broja bioseparacijskih procesa.
- Povećanjem koncentracije biokatalizatora ili stanica proizvođača u bioreктору

# Primjena membranskih bioreaktora

**MEMBRANE BIOREACTORS IN THE TREATMENT  
OF WASTEWATER GENERATED FROM  
AGRICULTURAL INDUSTRIES AND ACTIVITIES**

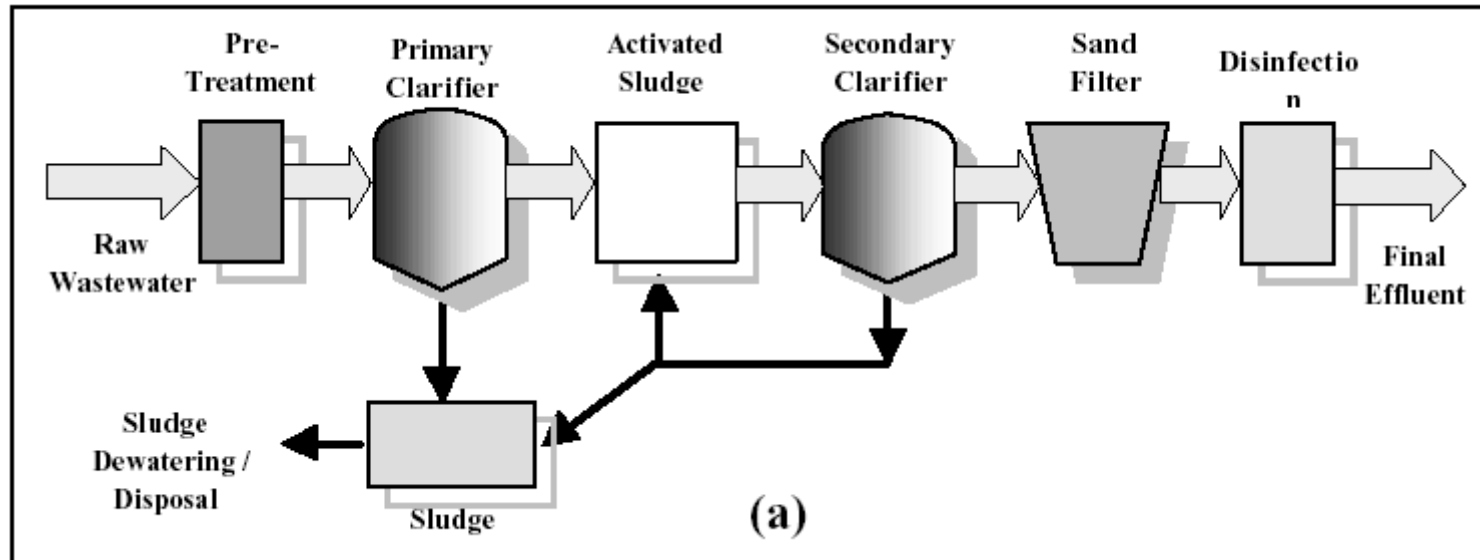


# Primjena membranskih bioreaktora

## Prednosti :

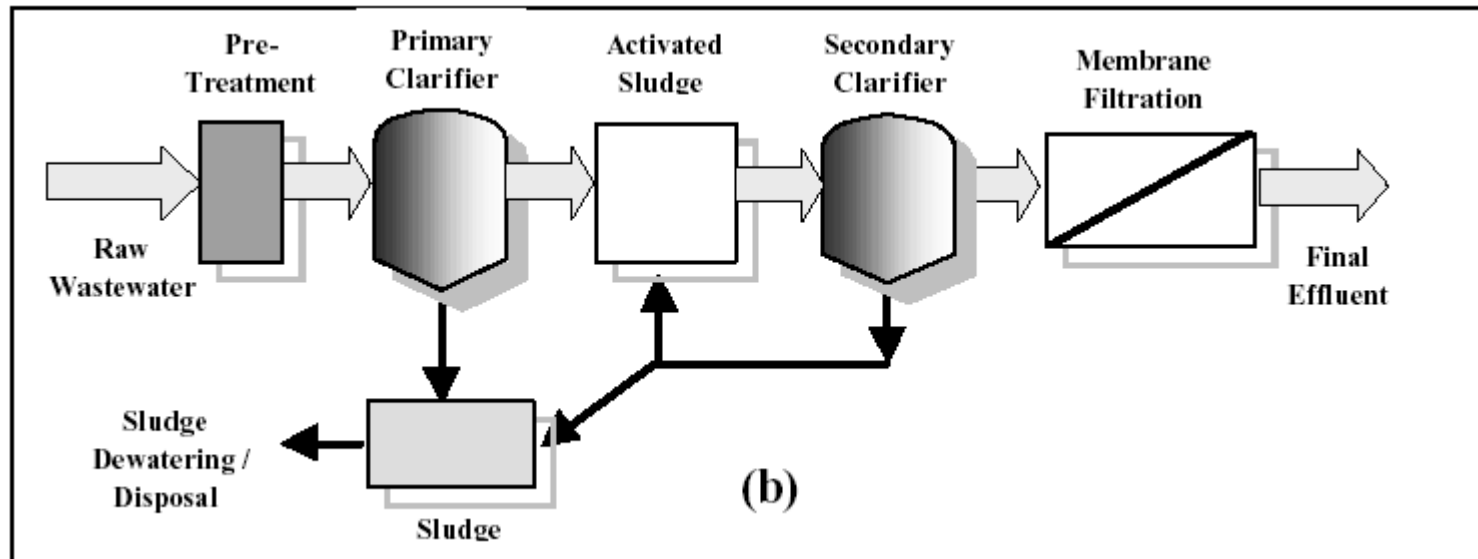
- dobra kontrola biološke aktivnosti
- visoka kvaliteta efluenta bez bakterija
- mala postrojenja
- velika brzina dotoka organskih tvari
  
- poluindustrijska postrojenja su postavljena u Francuskoj, SAD-u i Japanu
- primjenjuju se za pročišćavanje voda u zgradama i manjim naseljima, te industrijskih otpadnih voda i voda s poljoprivrednih površina

# Primjena membranskih bioreaktora



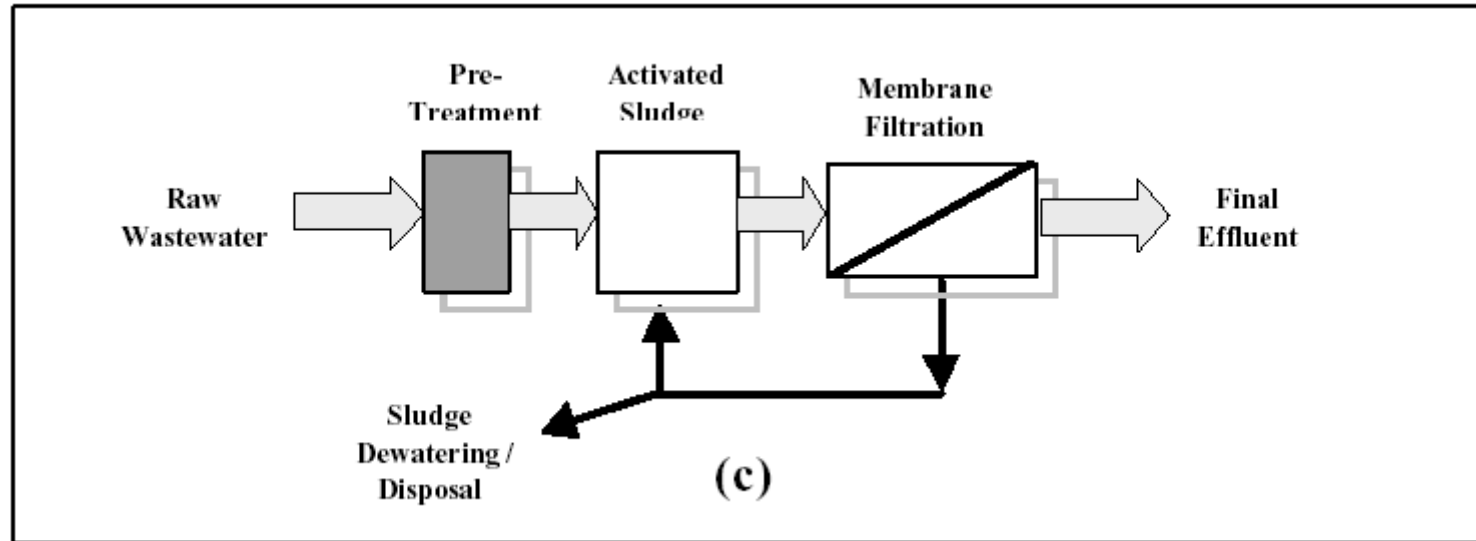
Procesna shema tradicionalne biološke obrade otpadnih voda

# Primjena membranskih bioreaktora



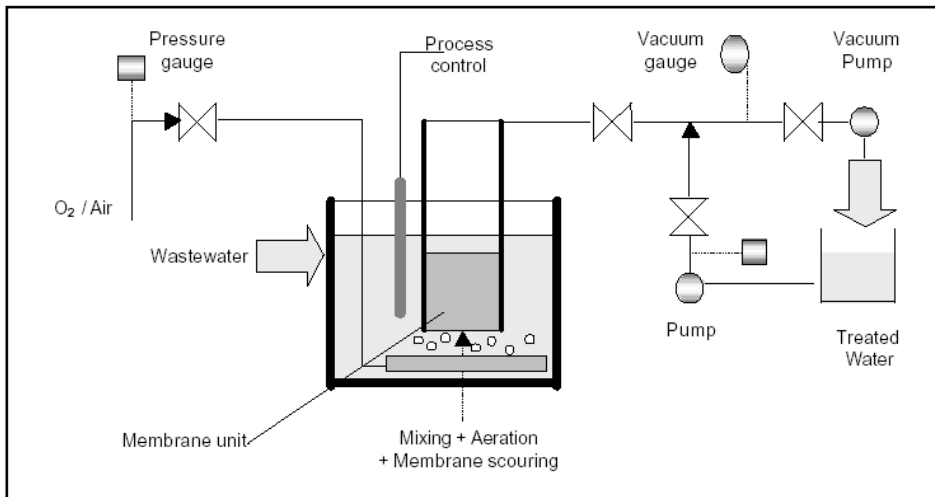
Procesna shema tradicionalne biološke obrade otpadnih voda s dodatnom membranskom filtracijom

# Primjena membranskih bioreaktora

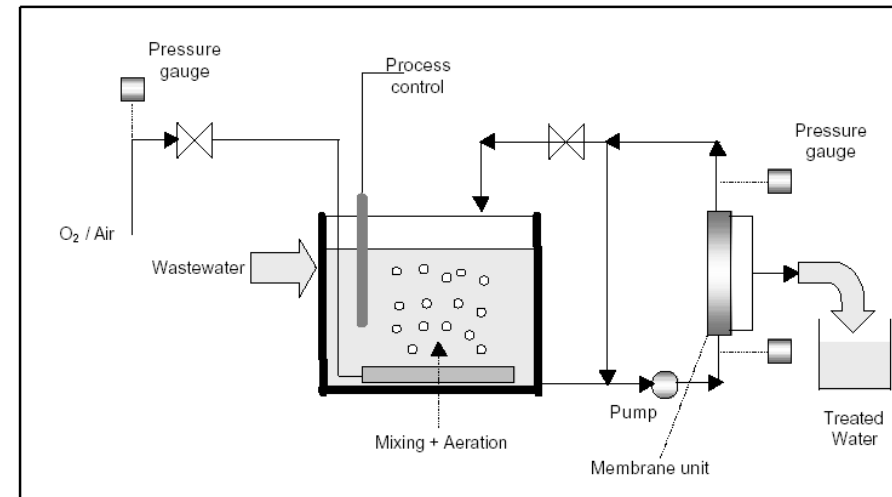


Procesna shema biološke obrade otpadnih voda s membranskim bioreaktorom

# Primjena membranskih bioreaktora



Procesna shema integriranog membranskog reaktora



Procesna shema membranskog reaktora s vanjskom separacijskom jedinicom

# Primjena membranskih bioreaktora

Table 2. Applications of biocatalytic membrane reactors in the agro-food industry		
Reaction	Membrane bioreactor	Purpose
Hydrolysis of lactose to glucose and $\beta$ -galactose ( $\beta$ -galactosidase)	Axial-annular flow reactor	Delactosization of milk or whey for human consumption
Hydrolysis of high-molecular-weight protein in milk (trypsin and chymotrypsin)	Asymmetric hollow fibre with gelified enzyme	Production of baby food
Hydrolysis of raffinose ( $\alpha$ -galactosidase and invertase)	Hollow fibre reactor with segregated enzyme	Production of monomeric sugars
Hydrolysis of starch to maltose ( $\alpha$ -amylase, $\beta$ -amylase, pullulanase)	CSTR with UF membrane	Production of syrups
Fermentation of sugars (yeast)	CSTR with UF membrane	Brewing industry
Anaerobic fermentation (yeast)	CSTR with UF membrane	Production of alcohol
Hydrolysis of pectines (pectinase)	CSTR with UF membrane	Production of bitterness and clarification of fruit juice and wine
Fermentation of <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	CSTR with UF membrane	Production of carboxylic acids
Removal of limonene and naringin ( $\beta$ -cyclodextrin)	CSTR with UF membrane	Production of bitterness and clarification of fruit juice
Hydrolysis of K-casein (endopeptidase)	CSTR with UF membrane	Milk coagulation for dairy products
Hydrolysis of collagen and muscle proteins (protease, papain)	CSTR with UF membrane	Meat tenderization
Conversion of glucose to gluconic acid (glucose oxidase and catalase)	Packed bed reactor	Prevention of discolouration and off-flavour of egg products during storage
Hydrolysis of triglycerides to fatty acids and glycerol (lipase)	UF capillary membrane reactor	Production of foods, cosmetics and emulsificants
Hydrolysis of cellulose to cellobiose and glucose (cellulase and $\beta$ -glucosidase)	Asymmetric hollow fiber reactor	Production of ethanol and protein
Hydrolysis of malic acid to lactic acid ( <i>Lactobacillus oenos</i> )	MF capillary membranes with entrapped cells	Improve taste in white wine
Hydrolysis of fumaric acid to L-malic acid (fumarase)	UF capillary membrane reactor	Production of food additives
Hydrolysis of olive oil triglycerides (lipase)	Hydrophobic plate-and-frame membrane reactor	Treatment of oils
Hydrolysis of soybean oil (lipase)	Hydrophilic hollow fiber membrane reactor	Treatment of oils
Hydrolysis of butteroil glycerides (lipase)	Hydrophobic flat-sheet membrane reactor	Treatment of oils and products for the cosmetics industry
Hydrolysis of milk fat (lipase)	Spiral-wound polypropylene membrane reactor	Treatment of fats and oils

Abbreviations: CSTR, continuous stirred tank reactor; UF, ultrafiltration; MF, microfiltration.

# Primjena membranskih bioreaktora

Table 3. Applications of biocatalytic membrane reactors in pharmaceutical and biomedical treatments

Reaction	Membrane reactor	Purpose
Conversion of fumaric acid to L-aspartic acid ( <i>Escherichia coli</i> with aspartase)	Entrapment in polyacrylamide gel	Pharmaceuticals and feed additives
Conversion of L-aspartic acid to L-alanine ( <i>Pseudomonas dacunhae</i> )	Entrapment in polyacrylamide gel	Pharmaceuticals
Conversion of cortexolone to hydrocortisone and prednisolone ( <i>Curvularia lunata/Candida simplex</i> )	Entrapment in polyacrylamide gel	Production of steroids
Conversion of acetyl-D,L-amino acid to L-amino acid (aminoacylase)	Ionic binding to DEAE-sephadex	Production of L-amino acids for pharmaceutical use
Synthesis of tyrosine from phenol, pyruvate and ammonia (tyrosinase)	Entrapment in cellulose triacetate membrane	Production of L-amino acids for pharmaceutical use
Hydrolysis of a cyano-ester to ibuprofen (lipase)	Entrapment in biphasic hollow fibre reactor	Production of anti-inflammatories
Production of ampicillin and amoxycillin (penicillin amidase)	Entrapment in cellulose triacetate fibers	Production of antibiotics
Hydrolysis of a diltiazem precursor (lipase)	Entrapment in biphasic hollow fibre reactor	Production of calcium-channel blocker
Hydrolysis of 5-p-HP-hydantoine to D-p-HP-glycine (hydantoinase and carbamylase)	Entrapment in UF polysulfone membrane	Intermediate for the production of cephalosporin
Dehydrogenation reactions (NAD(P)H-dependent enzyme systems)	Confination with UF-charged membrane	Production of enantiomeric amino acids
Hydrolysis of DNA to oligonucleotides (DNase)	Gelification on UF capillary membrane	Production of pharmaceutical substances
Hydrolysis of hydrogen peroxide (bovine liver catalase)	Entrapment in cellulose triacetate membrane	Treatment in liver failure
Hydrolysis of whey proteins (trypsin, chymotrypsin)	Polysulfone UF membrane	Production of peptides for medical use
Hydrolysis of arginine and asparagine (arginase and asparaginase)	Entrapment in polyuretane membrane	Care and prevention of leukaemia and cancer

Abbreviation: UF, ultrafiltration.