

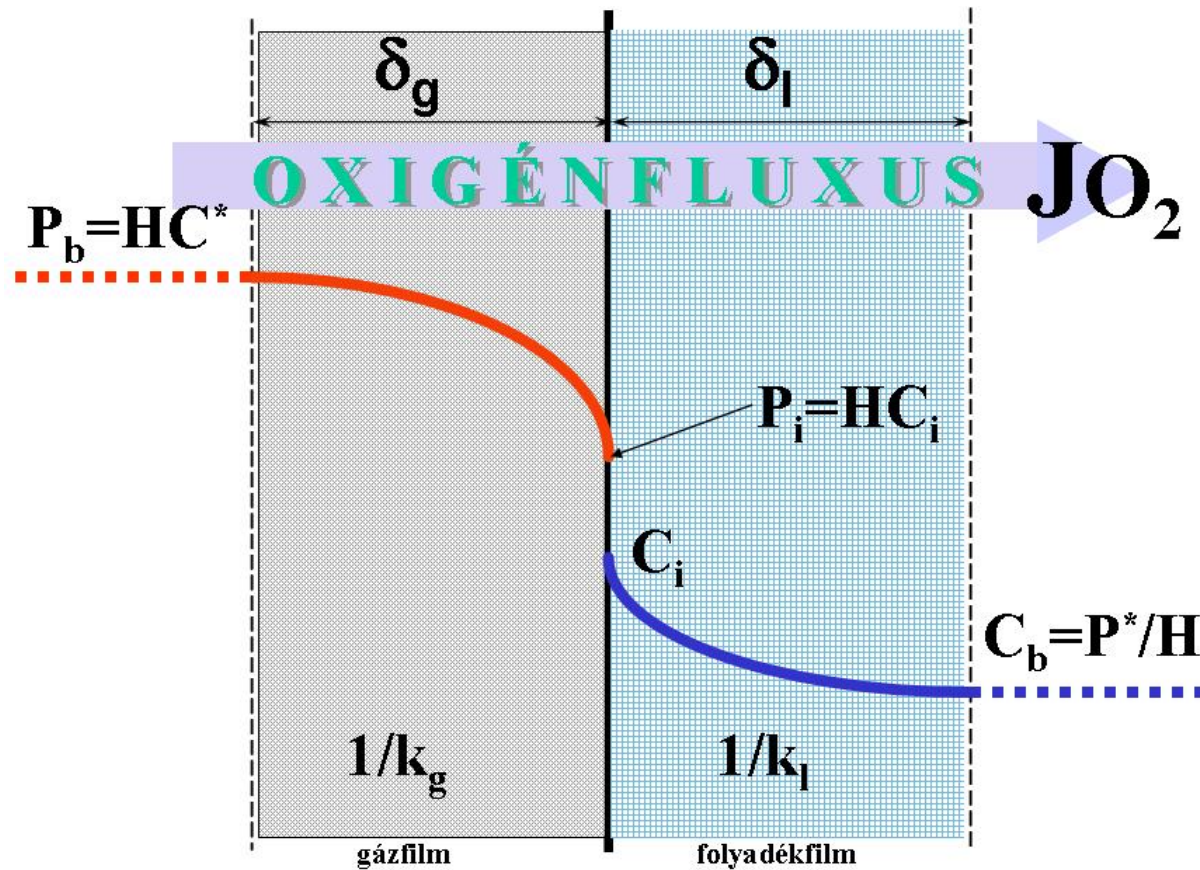


AIRLIFT ÉS FOTOBIOREAKTOROK

Urbán Eszter, Hajnal Bertalan

ISMÉTLÉS

- Az oxigénabszorpció kétfilmelméleti modellje



ISMÉTLÉS

- Eredő oxigénabszorpció-sebessége:

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

K_L – eredő folyadékoldali tömegátadási tényező
[cm/s]

a – fajlagos anyagátadási felület [1/cm]

$K_L a$ – eredő folyadékoldali oxigénabszorpció
együttható [1/h]

$$K_L a = f(T; I)$$

C^* - telítési oxigénkoncentráció (mg/dm³)

C – aktuális oldott oxigén-koncentráció (mg/dm³)

ISMÉTLÉS

- maximális eredő oxigénabszorpció-sebesség

$$K_L a * C^* = OTR \left[\frac{kg O_2}{m^3 * h} \right]$$

- VVM: egységnyi fermentlé-térfogatba bevitt levegőtérfogat percenként [$m^3/m^3/perc$]
- Energiafajlagos: egy kWh energiabevittel mennyi oxigénoldódás érhető el

4.38. táblázat: Gáz/folyadék érintkeztetők (aerob bioreaktorok) jellemzői

LEVEGŐZTETÉS TÍPUSA	FERMENTORTÍPUS	GÁZFÁZIS	GÁZ-SEBESSÉG ms ⁻¹	a m ⁻¹	H _O %
lyuggatott tányér	Pressure Cycle	diszperz	0,6	50	50–90
töltött oszlop	csepegtetőtestes (szennyvíztisztítás)	folytonos	0,9	16	90
buborékkolonna	-	diszperz	0,02	7	8
STR	-	diszperz	0,06	25	15

4.39. táblázat: Aerob bioreaktorok összehasonlítása

TÍPUS	μ Pa.s	Mechanikus teljesítmény-bevitel kW/m ³	Teljesítmény-bevitel levegővel kW/m ³	K _L a h ⁻¹	OTR kg/m ³ h	V _{max} m ³
STR (flat blade)	>2	2–5	4,5	200	3	450
STR (tirbina)	<2	3	(1)	720	5	80–160
Levegőztetett tartály kerülővezetékkel		(1)	3	2–300	6	400
Buborékkolonna			2,5 5 1	160 400 3–4000	6 6	500
Pressure Cycle			5	400	8 5–15	2300
Merülő sugaras	<0,1	3,5	1	600	4,5–12	300
Szitatányéros			3,5	300–1000	5	80
JLR	<0,1	1,5	3,5	700	8	200
JLR (mammut-szivattyú)	<0,1		3,5	350	7	400
JLR (csőreaktor)					30–50	

ISMÉTLÉS

- Oxigénátadás buborékokból (K_L és a becslése)

$$a = \frac{1}{V} nqt_b \frac{d_b^2}{\frac{d_b^3}{6}} = \frac{nqt_b}{V} * \frac{6}{d_b}$$

$$a = H_0 \frac{6}{d_b}$$

- Hold up: $H_0 = \text{gáztérfogat} / \text{teljes térfogat}$
($H'_0 = \text{gáztérfogat} / \text{folyadék térfogat}$)

DEFINÍCIÓ

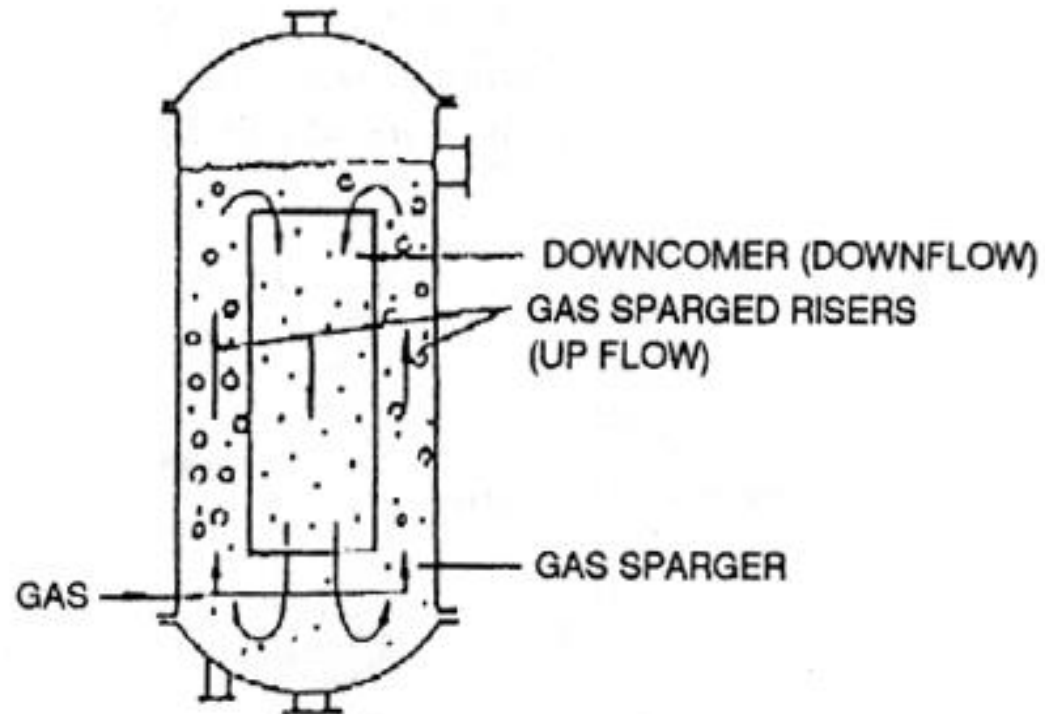
- **Airlift:** buborékkolonns hurokreaktor

„Levegőztetett tartály, belső léccirkulációjú pneumatikus elvű hurokreaktor, amelyben a folyadékmozgás hajtóerejét a reaktor gáz/folyadék diszperziójának a kerülővezetékben levő buborékszegény folyadéknál kisebb sűrűsége szolgáltatja.”

$$\rho_{\text{főtömeg}} < \rho_{\text{kerülővezeték}}$$

FELÉPÍTÉS

- $H_0 \sim u_g^n$
- Az anyagátadás elsődleges meghatározója a gáz hold up



ELŐNYÖK

- Könnyebb sterilitás fenntartás (nincs keverőtengely-bevezetés)
- Nagy fermentorok is készíthetőek
- Hűtési igény 20-35%-kal kisebb (nincs mechanikus energiabevitel, csak **pneumatikus**)
- Olcsóbb bioreaktor (kevesebb anyagfelhasználás)
- Csendesebb (változtatható levegőztetésű ~ változtatható keverésű)
- Motor, áttétel, csapágyazás fenntartási költségei hiányoznak
- Légekompreszorok gőzmeghajtásúak is lehetnek (költséghatékonyságot növelheti)

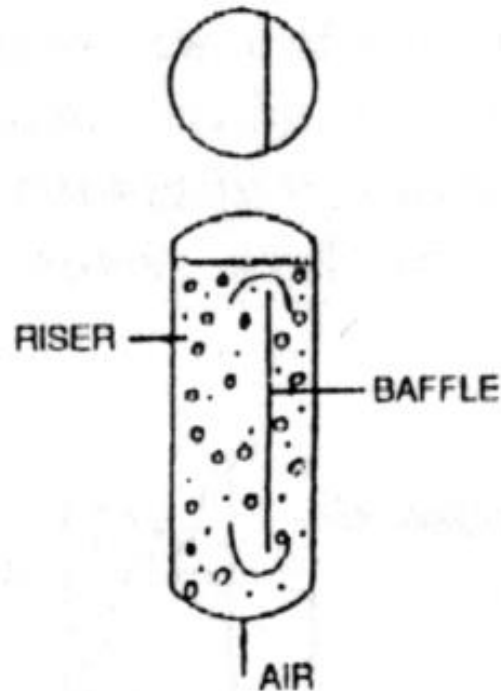
ALKALMAZÁS

- OTR = f (folyadéktulajdonságok; folyadékmozgás intenzitása; H_0)
- Folyadéktulajdonságok: csak kis ($\eta < 2$ Pas) viszkozitású – newtoni viselkedésű – fermentlevek kezelésére
- → SCP-fermentáció; élesztőfermentáció

OSZTÁLYOZÁS

Belső léccirkulációjú HR

- Osztott henger alakú

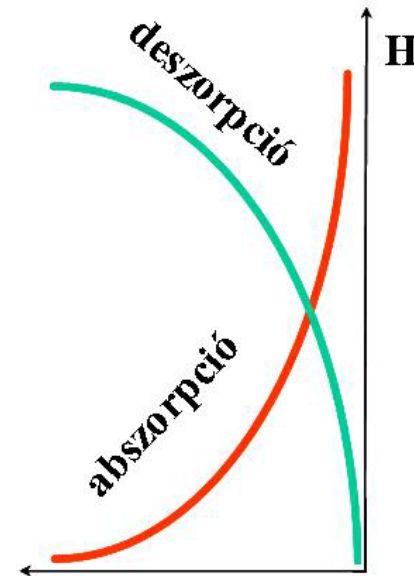
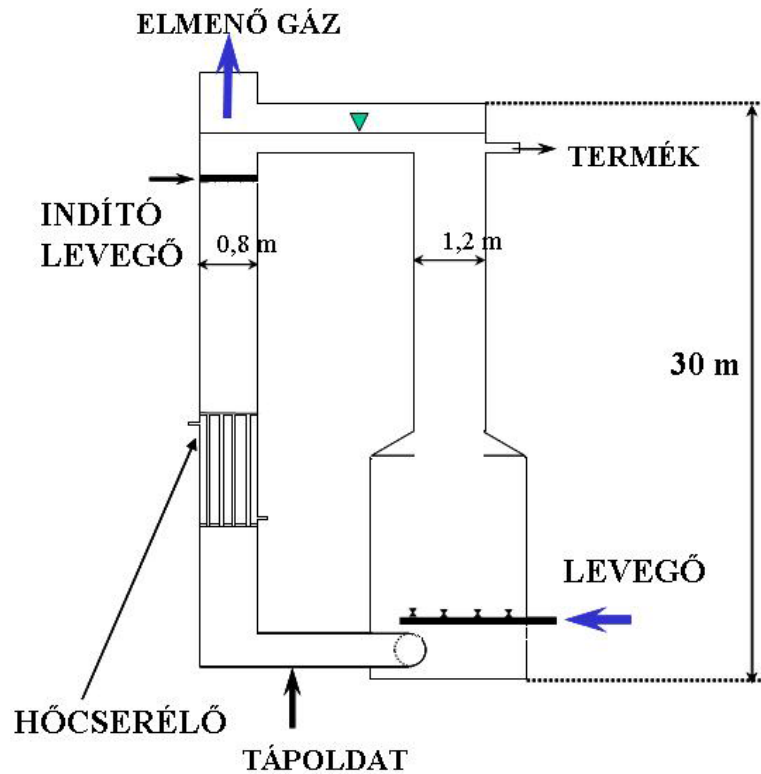


Külső léccirkulációjú HR

- Külső cirkulációjú PCR (Pressure Cycle Reactor) – (ICI)
 - 40 m³
 - 1000 t/év SCP
 - OTR = 5 – 15 kg/m³h
 - Intenzív cirkuláció
 - Nagy hidrosztatikai nyomás
 - Alsó beadagolású
 - QUORN

OSZTÁLYOZÁS

Külső léccirkulációjú HR

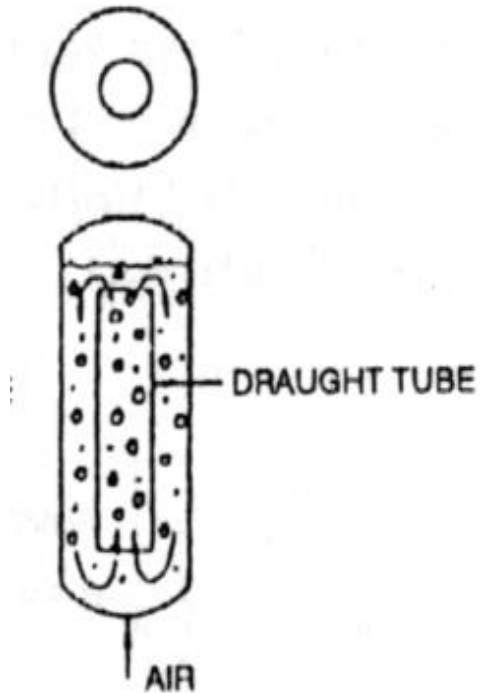


Külső cirkulációjú PCR

OSZTÁLYOZÁS

Belső lécirkulációjú HR

- Koncentrikus csövekből álló (2 koncentrikus cső)



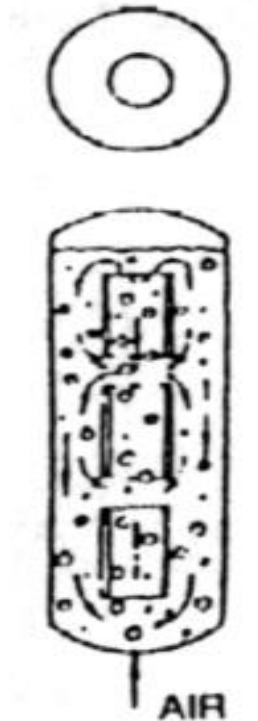
Külső lécirkulációjú HR

- Vogelbusch IZ (+HTPJ)
- A készülék tetejére felnyomott lé egy fúvókán keresztül szabad sugár formájában ömlik ki és csapódik be a folyadék főtömegbe.
- $12 \text{ kgO}_2/\text{m}^3\text{h}$

OSZTÁLYOZÁS

Belső léccirkulációjú HR

- Koncentrikus csövekből álló (MULTIPLE)

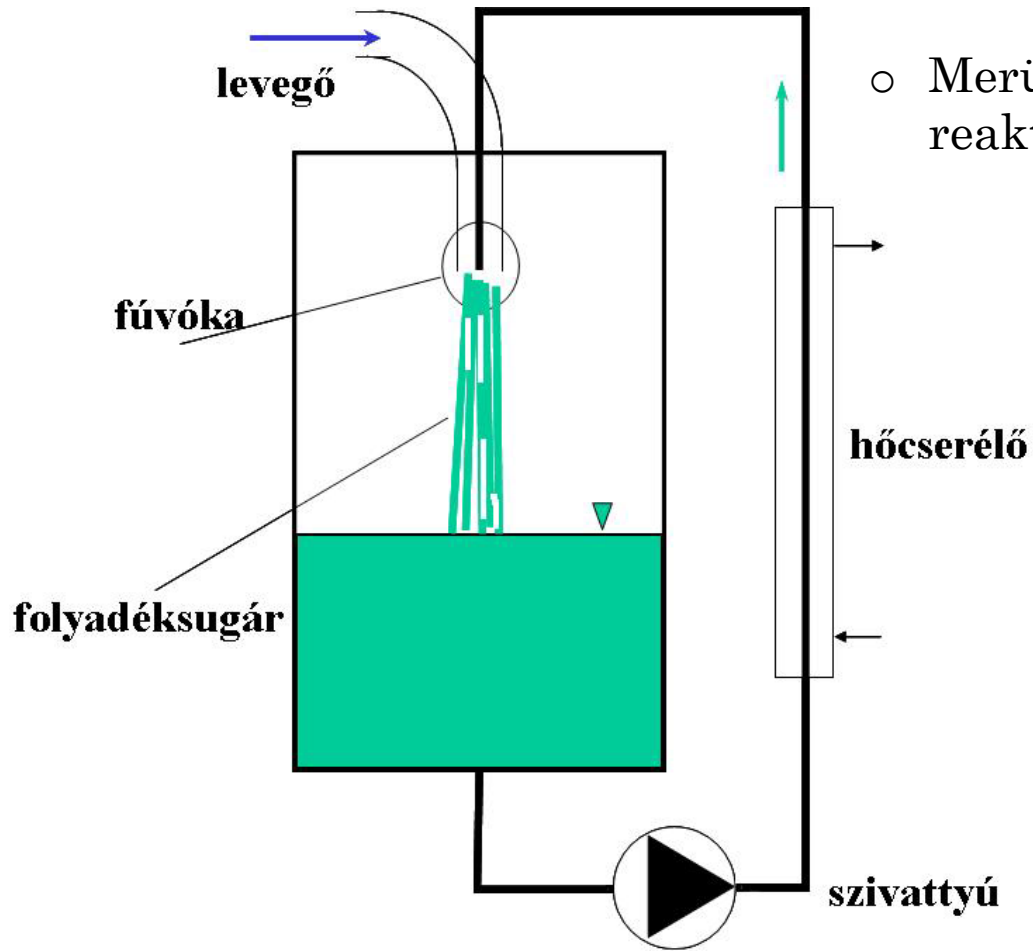


Külső léccirkulációjú HR

- Merülősugaras reaktor
- Az oxigénátadás három régiója:
 - gázfázison keresztülhaladó folyadéksugarba történő anyagátadás
 - anyagátadás a folyadék felszínén
 - buborékokból történő anyagátadás a folyadék főtömegében

OSZTÁLYOZÁS

Külső léccirkulációjú HR

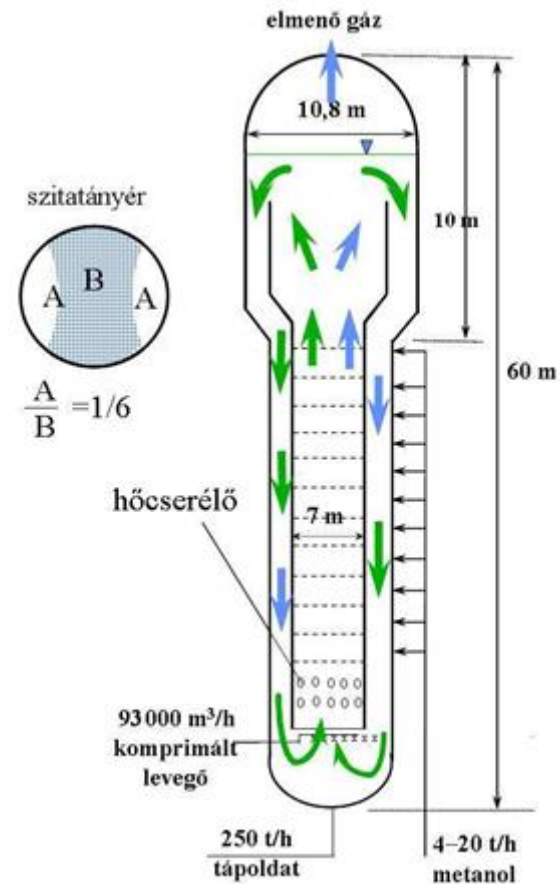


- Merülősugaras Vogelbusch IZ reaktor

OSZTÁLYOZÁS

Belső léccirkulációjú HR

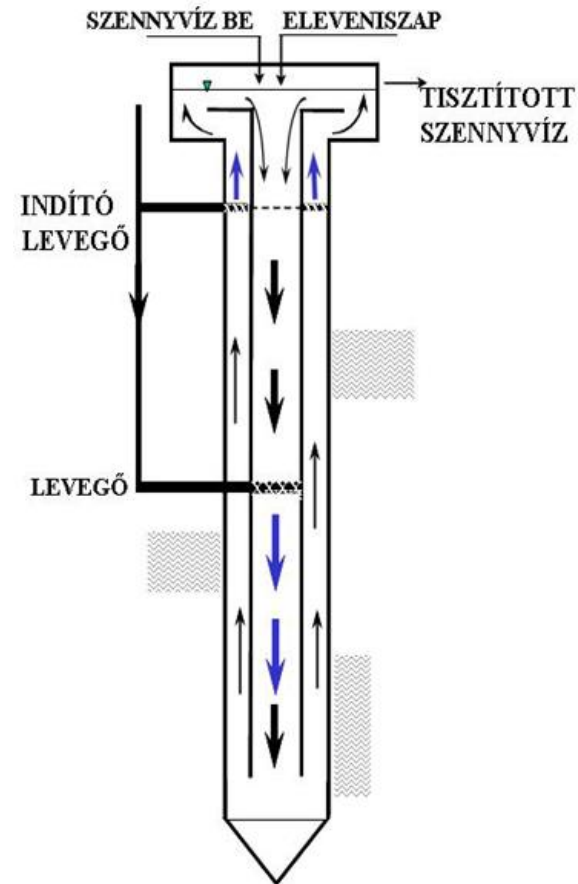
- ICI: belső cirkulációjú PCR
 - 2300 m³
 - 70 000 t/év SCP (PRUTEEN)
 - 60 m magas
 - 19 szitatányér
 - 1000 szubsztrátadagoló-hely
 - 5 – 6 bar hidrosztatikai nyomás + kedvező áramlási viszonyok (v_b 0,015-0,03 m/s; léforgatási idő: 6 – 30/h; lésebesség: 0,2 – 1 m/s) = jó $K_L a$
 - OTR = 8 kg/m³h
 - Energiafajlagos: 0,3 kWh/kgO₂



OSZTÁLYOZÁS

Belső léccirkulációjú HR

- ICI Deep Shaft
 - 136 m magas
 - 0,5 m átmérő
 - 90% oxigénhasznosulás
 - $OTR = 2 \text{ kg/m}^3\text{h}$
 - Energiafajlagos: 8 kWh/kgO_2
 - Szennyvíztisztítás (USA)



AIRLIFT REAKTOROK BELSŐ ALKATRÉSZEI

LEVEGŐELOSZTÓK

- Feladat: gáz beinjektálása a reaktorba
- Cél: kis buborékméret elérése
- A gáz hold up fordítottan arányos a buborék átmérővel
- Osztályozás:

statikus levegőelosztók

dinamikus levegőelosztók

STATIKUS LEVEGŐELOSZTÓK

- Komprimált levegő átvezetése kisméretű lyukakon

A levegő nyomásesése:

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_h$$

Δp_s : levegő elosztón mérhető nyomásesés, függ: lyukmérettől

Δp_h : fermentlé hidrosztatikai nyomása

Egységnyi térfogatba bevitt energiaérték:
$$\frac{P_g}{V} = \frac{F\rho_g}{V} \left(\frac{\alpha V_0^2}{2} + \frac{RT}{M} \ln \frac{P_0}{P} \right)$$

F : gázsebesség m³/s

ρ_g : gázsűrűség

$\alpha \sim 0,06$ a gázelosztón a gáz kinetikus energiájának ekkora hányada adódik át a folyadéknak

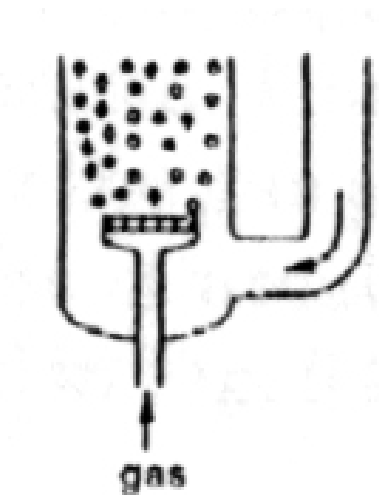
V_0 : lineáris gázsebesség a levegő elosztón

P_0 : nyomás a levegőelosztónál

P : a légköri nyomás

- Kis gázsebességnél alkalmazzák – buborékos áramlás

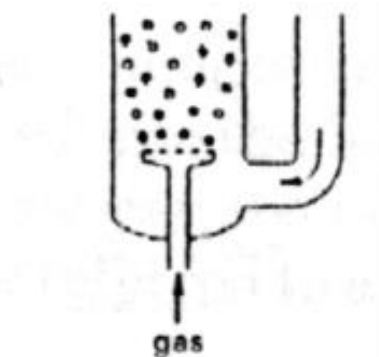
A STATIKUS LEVEGŐELOSZTÓK KIVÁLASZTÁSI SZEMPONTJAI



POROUS PLATE

Porózus tányér:

- Drága
- Nagy nyomáscsökkenés – magas üzemeltetési költség
- Eltömődés – befertőződés forrása



PERFORATED PLATE
OR PERFORATED PIPE

Perforált lemez:

- Olcsóbb
- Alacsonyabb üzemeltetési költségek

Egyszerű fúvókák

- Csak gázbevezetés

DINAMIKUS LEVEGŐELOSZTÓK

- Jet hurokreaktorok (JLR)
- Többlet energia bevitel
- A folyadéksugár kinetikus energiája határozza meg a gázelosztást, anyagátadást
- Az egyenlet bővül a folyadéksugár energiájával:

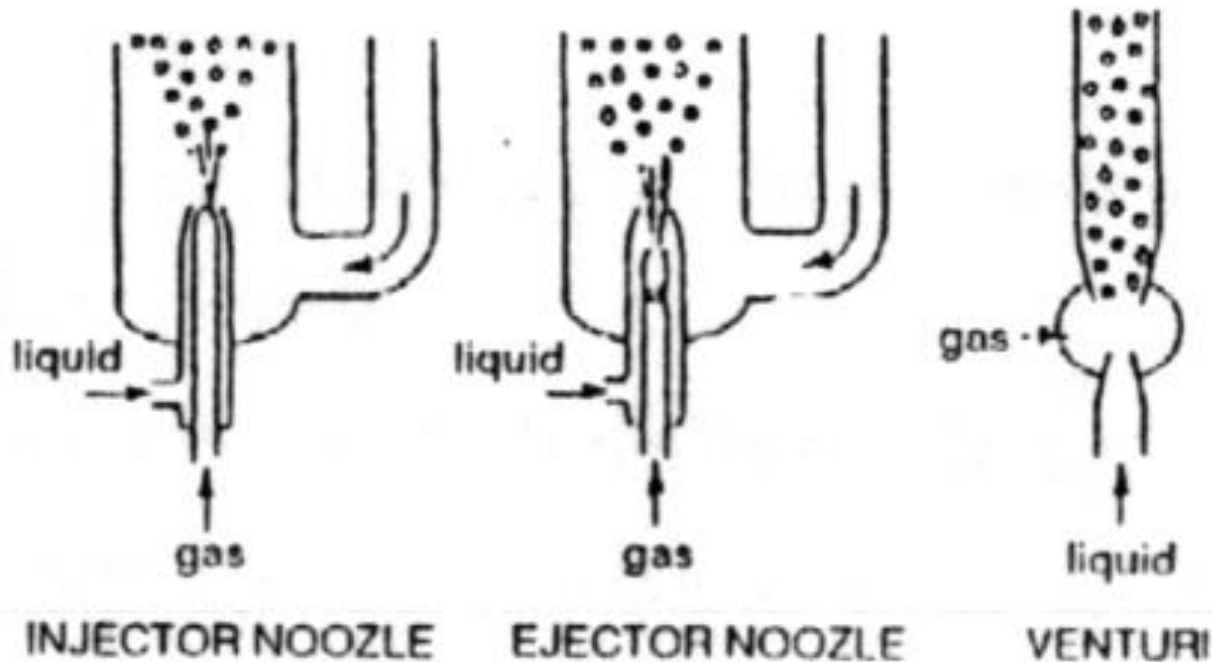
$$\frac{P_L}{V} = \frac{8}{\pi V} \frac{F_L^3}{D_N^2} \rho_l$$

F_L : a folyadéksugár térfogatárama

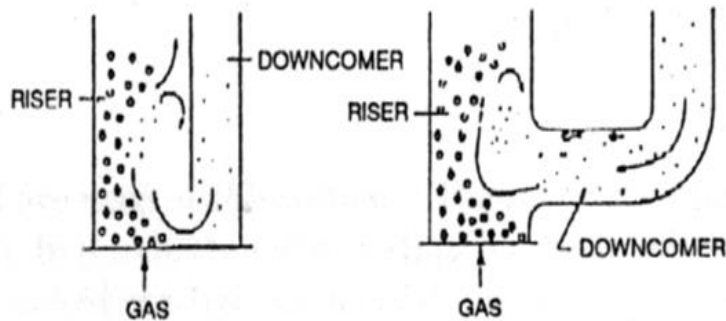
D_N : a folyadéksugár injektor átmérője

- Nagy gázsebességeknél alkalmazzák – habzó turbulens buborék mozgás
- Szövettenyésztésnél, nyírásérzékeny mikroorganizmusoknál nem alkalmazhatóak – folyadékpumpa nagy nyíróereje miatt

DINAMIKUS LEVEGŐELOSZTÓK



ELHELYEZÉS ÉS ÁRAMLÁSI KÉP

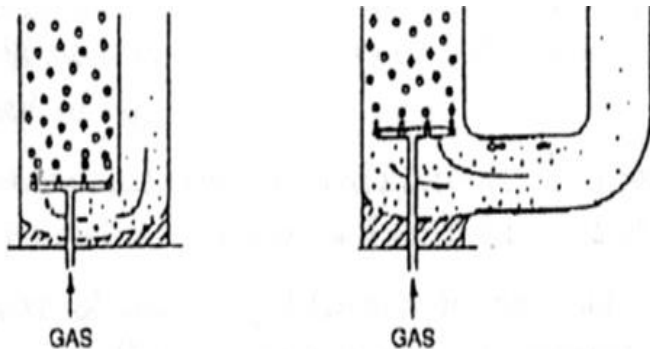


A felszálló ág alján:

- Általános megoldás
- Kis méretű reaktoroknál
- Magas air-lift reaktoroknál

A felszálló ágban:

- Tökéletesebb gázdiszperzió



A leszálló ágban:

- deep air-lift reaktoroknál – speciális megoldás
- Bevezetés több helyen – kisebb az egyes bevezetőkre eső hidrosztatikai nyomás

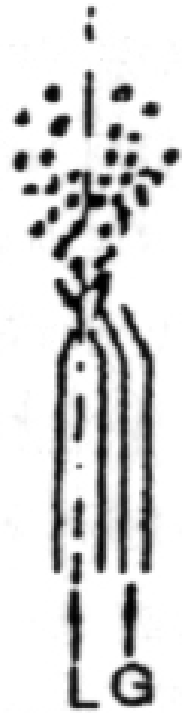
FÚVÓKÁK (NOZZLES)

Feladat:

- Diszpergálás és homogenizálás – a gázt a nagy sebességű folyadéksugár diszpergálja

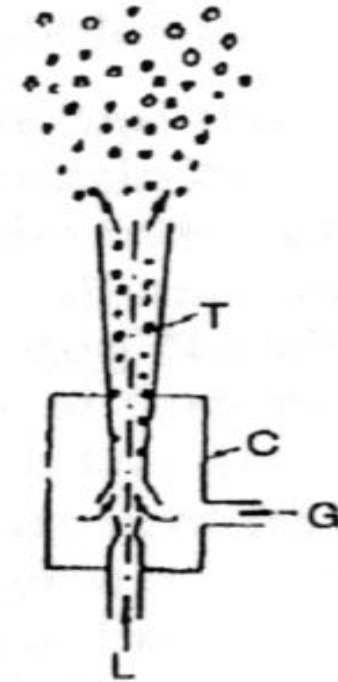
Típusai:

- Egyszerű kétfázisú fúvóka – *reaktor fenéken*
- Kétfázisú fúvóka momentum kiegyenlítő csővel – *hagyományos üzemmódban reaktor alján*
- Kétfázisú fúvóka keverőkamrával
- Radiális áramlású fúvóka
- Vertikális áramlású fúvóka
- Merülősugaras fúvóka



Egyszerű kétfázisú fúvóka

- Reaktor alján

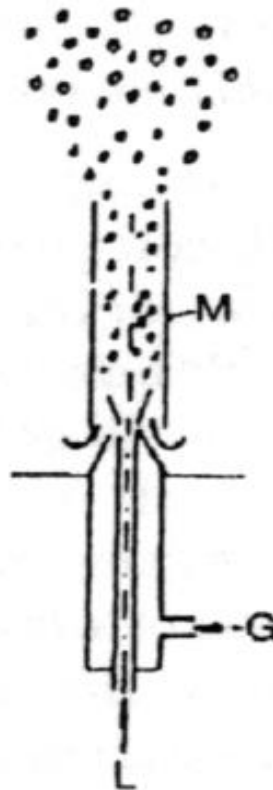


Kétfázisú fúvóka keverőkamrával

- Reaktor alján

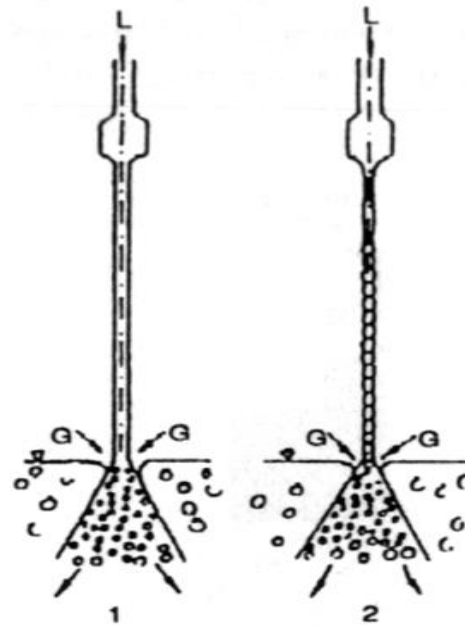
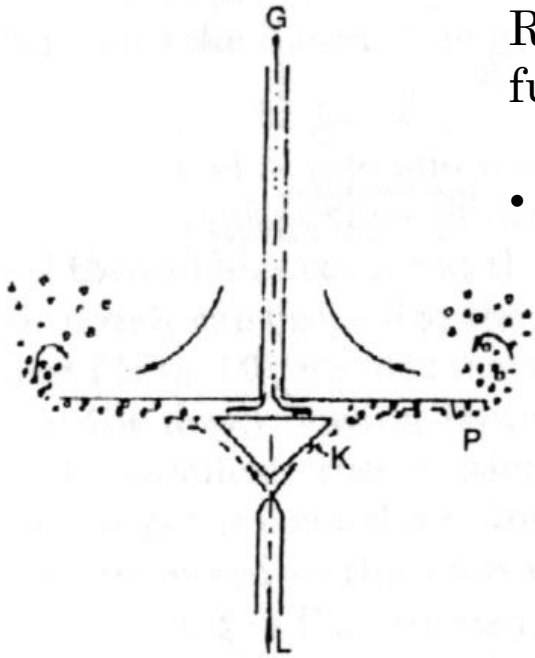
Kétfázisú fúvóka momentumkiegyenlítő csővel

- Reaktor alján, tetején



Radiális áramlású fúvóka

- Reaktor alján

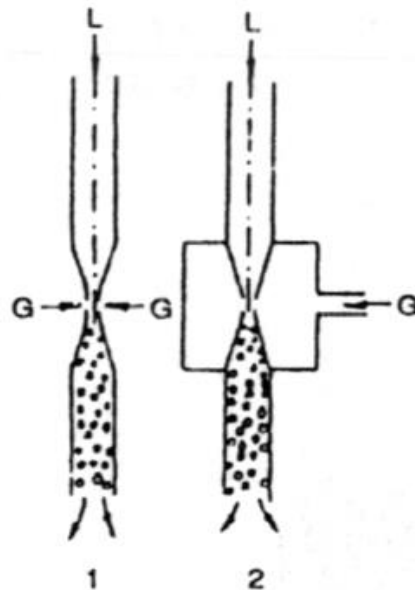


Merülősugaras fúvóka

- Reaktor tetején

Vertikális áramlású fúvóka

- Reaktor tetején



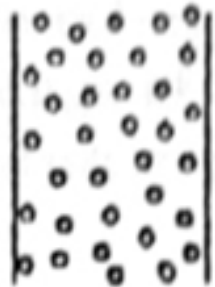
REAKTOROK HIDRODINAMIKÁJA, ÁRAMLÁSI TARTOMÁNY

ÁRAMLÁSI KÉPEK

- Az áramlási képek függenek a reaktor geometriájától, a fermentlé tulajdonságaitól és a gáz áramlási sebességétől

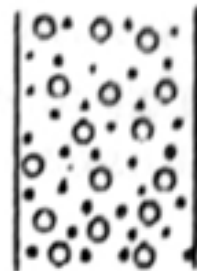
Gáz áramlásától függően kialakuló áramlási tartományok:

Zavartalan
buborékáramlás



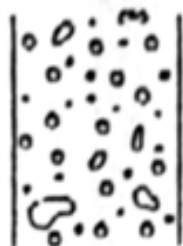
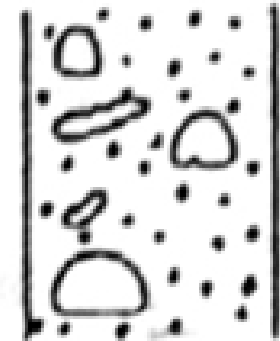
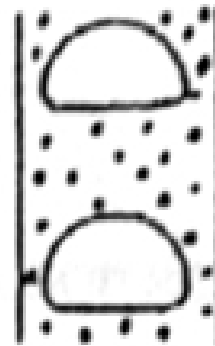
BUBBLE FLOW

Átmeneti
tartomány



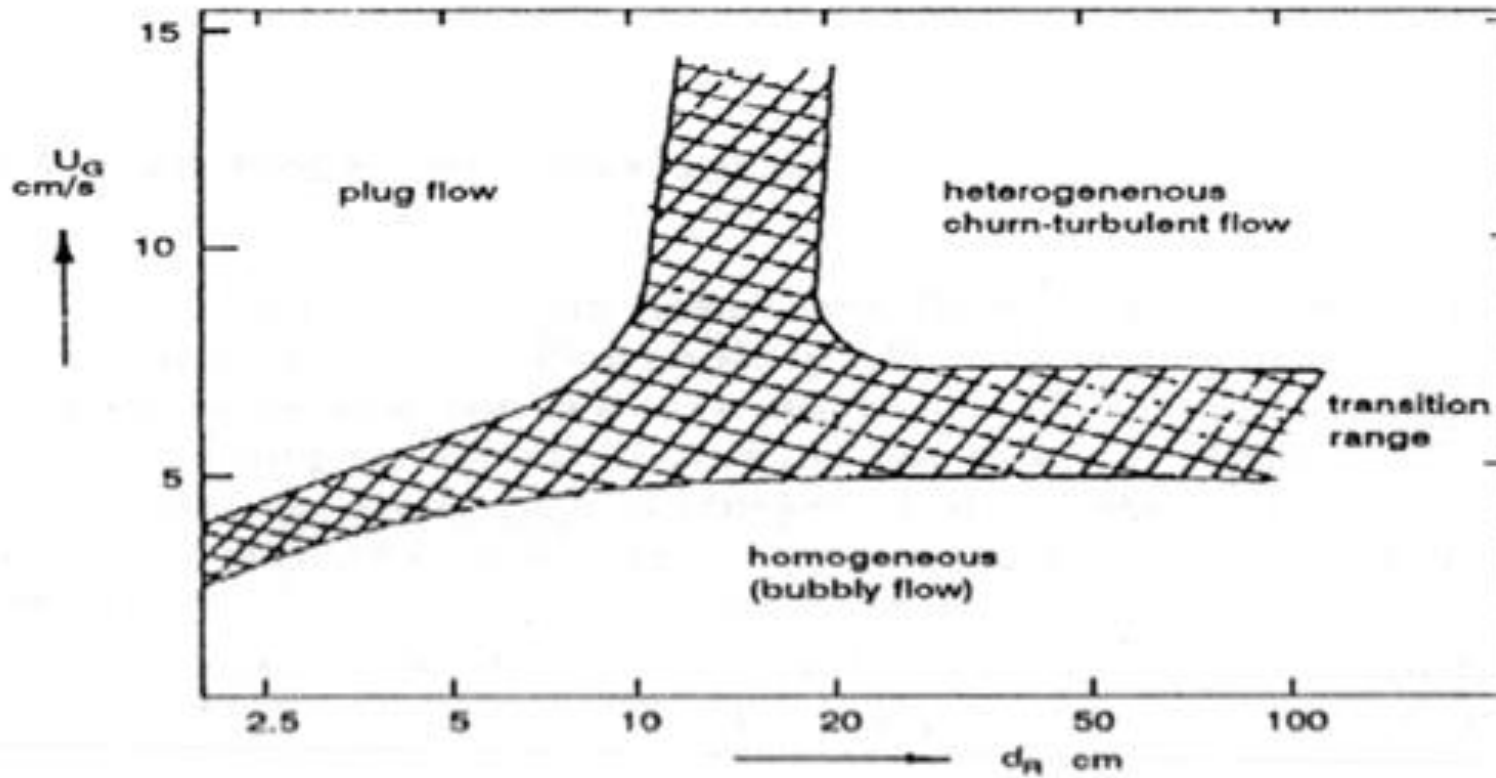
COALESCED
BUBBLE FLOW

Lökésszerű áramlás



Kavargó, turbulens
áramlás

CHURN-TURBULENT



Áramlási térkép segítségével megállapítható, hogy a reaktor milyen tartományban üzemel.

Ismerni kell:

- Reaktor átmérő
- Lineáris áramlási sebesség

KEVEREDÉS ÉS FOLYADÉKRECIRKULÁCIÓ

KEVEREDÉS

A keveredés jellemezői:

- Keverési idő
- Folyadék diszperziós koefficiens – *teljes reaktorra – reaktor egyes régióira*
- Folyadék cirkuláció sebesség:

$$v_f = \alpha * v_g^\beta$$

α függ: -reaktor geometriájától
-folyadék tulajdonságaitól

β függ: -reaktor geometriájától
-áramlási tartománytól

Az első két tényező a pH szabályozásban fontos – *lokális pH érték növekedés gátlás*

A folyadék cirkulációs sebesség az *anyagátadásra és nyírási mértékre* van hatással.

KEVEREDÉS JELENSÉGE

Keveredés jelenségének tanulmányozása a reaktorban:

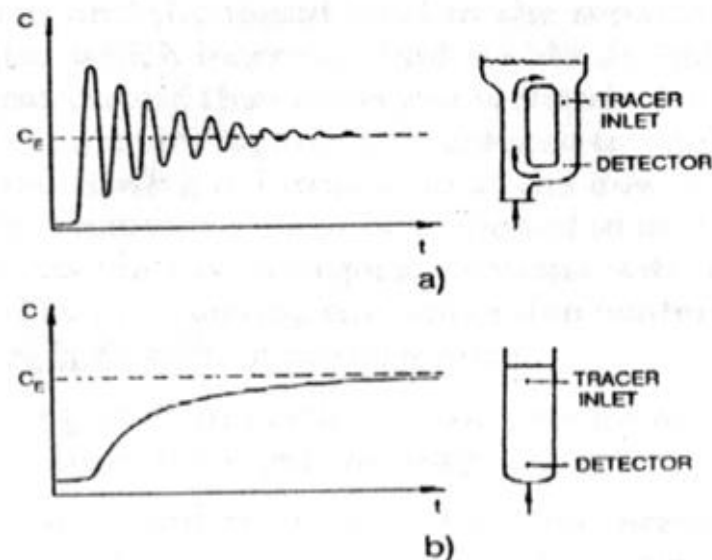
- Egységimpulzus zavarásra nézzük a válaszfüggvényt
- A betáplált anyaghoz nyomkövető anyagot adunk – detektor méri

Air-lift reaktorok:

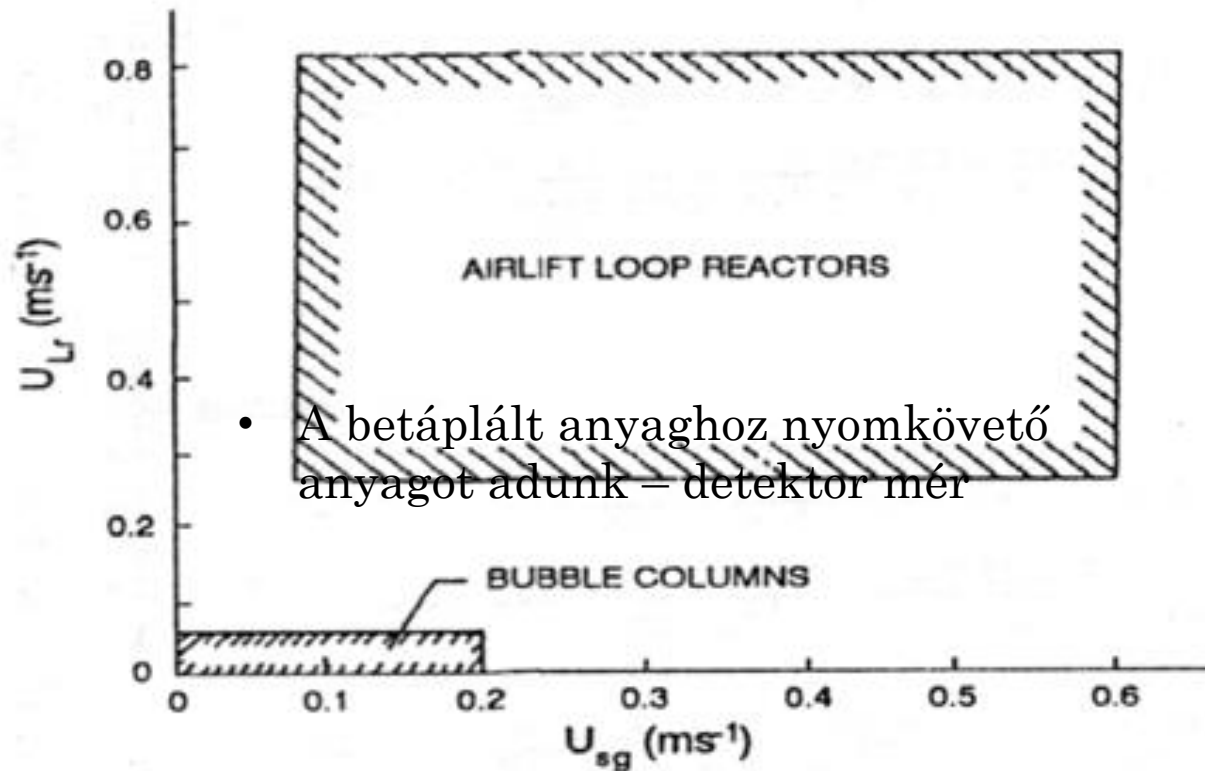
- Diszperzió mellett folyadékcirkuláció – csillapodó szinuszhullámú válaszjel fejezi ki

Buborékkolona:

- Kapott függvény alapján megállapítható a keveredés – tisztán diszpergáló



MŰKÖDÉSI TARTOMÁNY



- A betáplált anyaghoz nyomkövető anyagot adunk – detektor mér

Buborékkolonnák:

- Jelentős recirkuláció nélkül nem lehetséges nagy lineáris folyadék áramlási sebesség elérése

Air lift:

- Elérhető nagy lineáris folyadékáramlási sebesség recirk. nélkül.

HŐTRANSPORT

SZUBSZTRÁT ADAGOLÁS

Szubsztrát koncentráció alacsony szinten tartása:

- Toxicitás miatt
- Szubsztrát – inhibíció miatt

Megoldás:

- S adagolása a reaktor mentén több ponton

Hasonló megfontolások az oxigén esetében is:

- A fő betáplálási helyen kívül több kisebb betáplálási pont szükséges nagyobb aerob reaktoroknál

HŐTERMELÉS

Olyan fermentációnál érdemes megfigyelni, amely redukált C forrásokat használ nagy mértékben – *pl. metanol*

- Nagy mennyiségű hő szabadul fel – $3-5 \text{ kW/m}^3$

A hőfejlődés függ az oxigén fogyasztól:

- Bailey és Ollis – *E. coli*, *Candida intermedia*, *B. subtilis*, *A. niger*:

$$Q=(16,2\pm 0,4)R_{O_2}$$

Q: (kW/m³) hőfejlődés mértéke

R_{O₂}: (kg/m³s) O₂ fogyasztás

HŐÁTADÁS A REAKTORBAN

A hőátadás alapegyenlete:

$$Q=k*A*\Delta T$$

Q: hő [kW/m³]

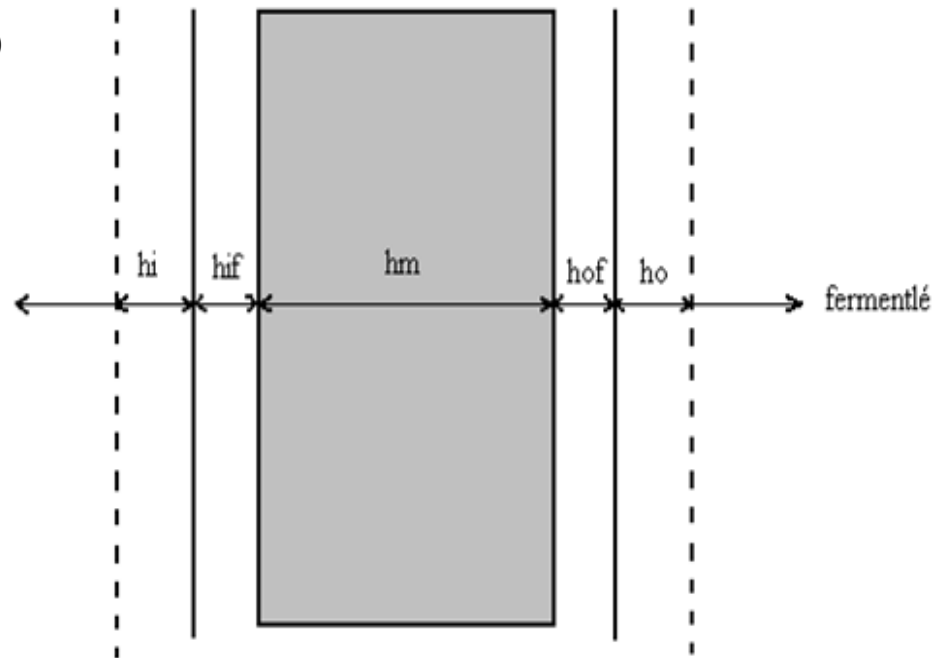
k: teljes hőátadási koeficiens

A: hőátadás felülete

ΔT : hőmérsékletkülönbség (hajtóerő)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_0}{\lambda_0} + \frac{h_{of}}{\lambda_{of}} + \frac{h_m}{\lambda_m} + \frac{h_{if}}{\lambda_{if}} + \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i}$$

hűtő v. fűtő
közeg

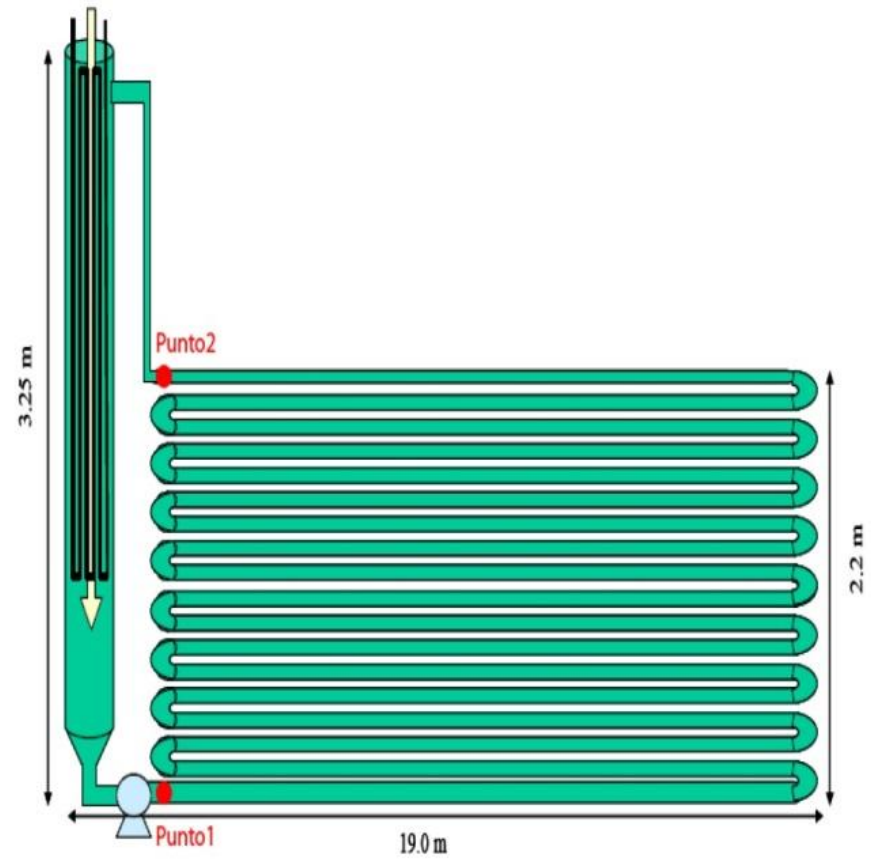


α : hőátadási tényező [W/m²K]

h: rétegvastagság [m]

λ : hővezetési tényező [W/mK]

FOTOBIOREAKTOROK (PBR)





OSZTÁLYOZÁS

- Nyitott rendszerek
 - Legegyszerűbb megoldás
 - Direkt besugárzás
 - Körbeáramlás
 - Limitált produktivitás
 - Párolgás



Nyitott rendszerű fotobioreaktor

OSZTÁLYOZÁS

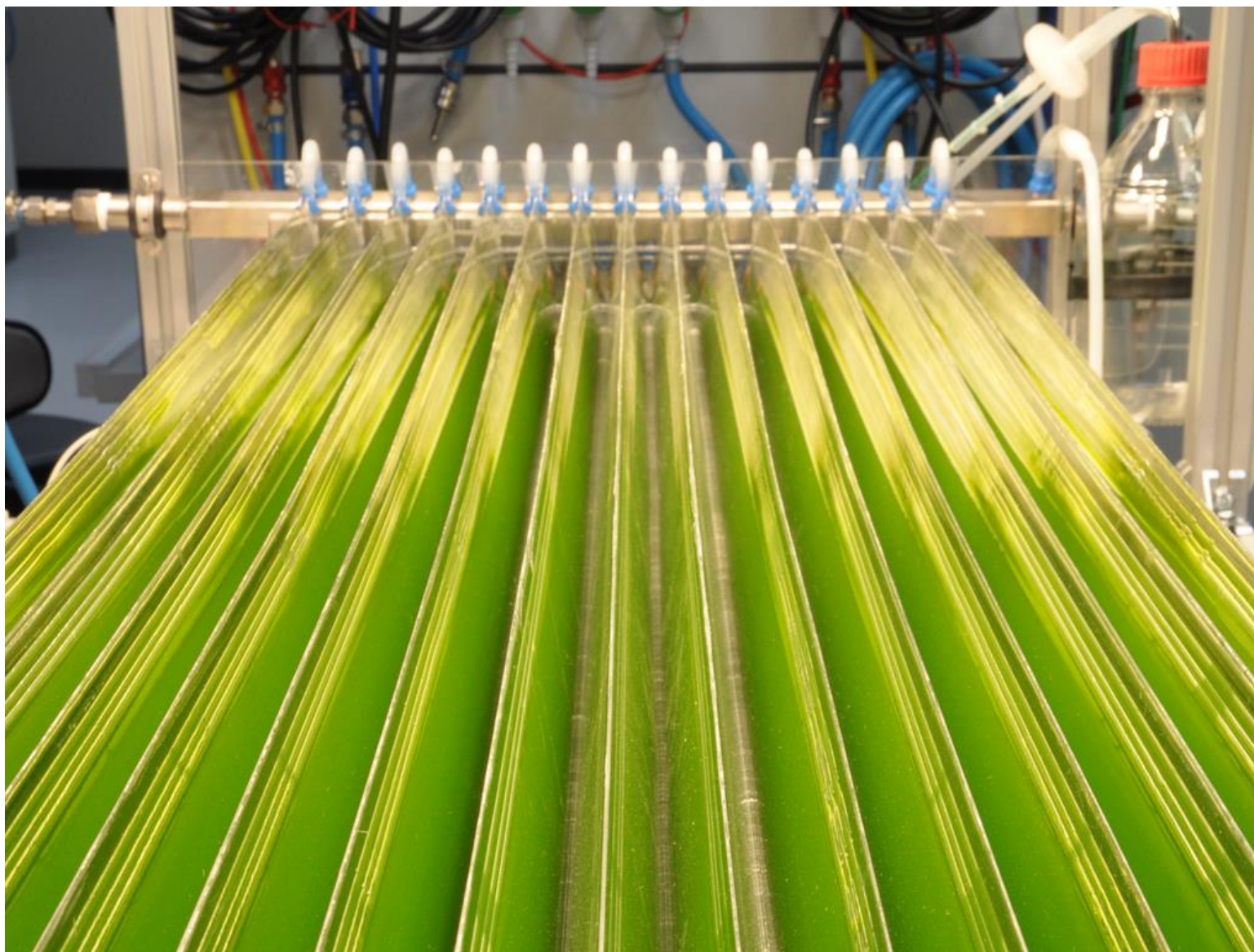
- Zárt rendszerek
 - Cső fotobioreaktorok
 - Karácsonyfa fotobioreaktor
 - Lemezes fotobioreaktor
 - Horizontális fotobioreaktor



Karácsonyfa fotobioreaktor



Lemezes fotobioreaktor



Horizontális fotobioreaktor

KÉRDÉSEK:

1. Mi az airlift reaktor definíciója?
2. Soroljon fel három előnyt a keverős bioreaktorokhoz képest?
3. Milyen belső alkatrészeket különböztetünk meg, ezeknek mi a szerepe?
4. Milyen áramlási tartományok alakulhatnak ki egy airlift reaktorban? Rajzoljon!
5. Hogyan csoportosítjuk a fotobioreaktorokat?