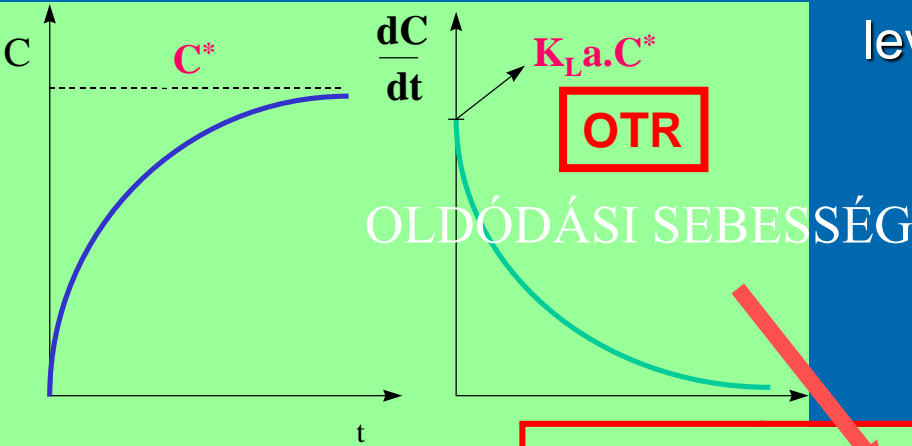


levegőztetés2



OLDÓDÁSI SEBESSÉG

FOGYASZTÁSI SEBESSÉG

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

mindíg

$$\frac{dC}{dt} = 0 \quad \text{és} \quad K_L a (C^* - C) = xQ$$

ÁLLANDÓSULT ÁLLAPOT

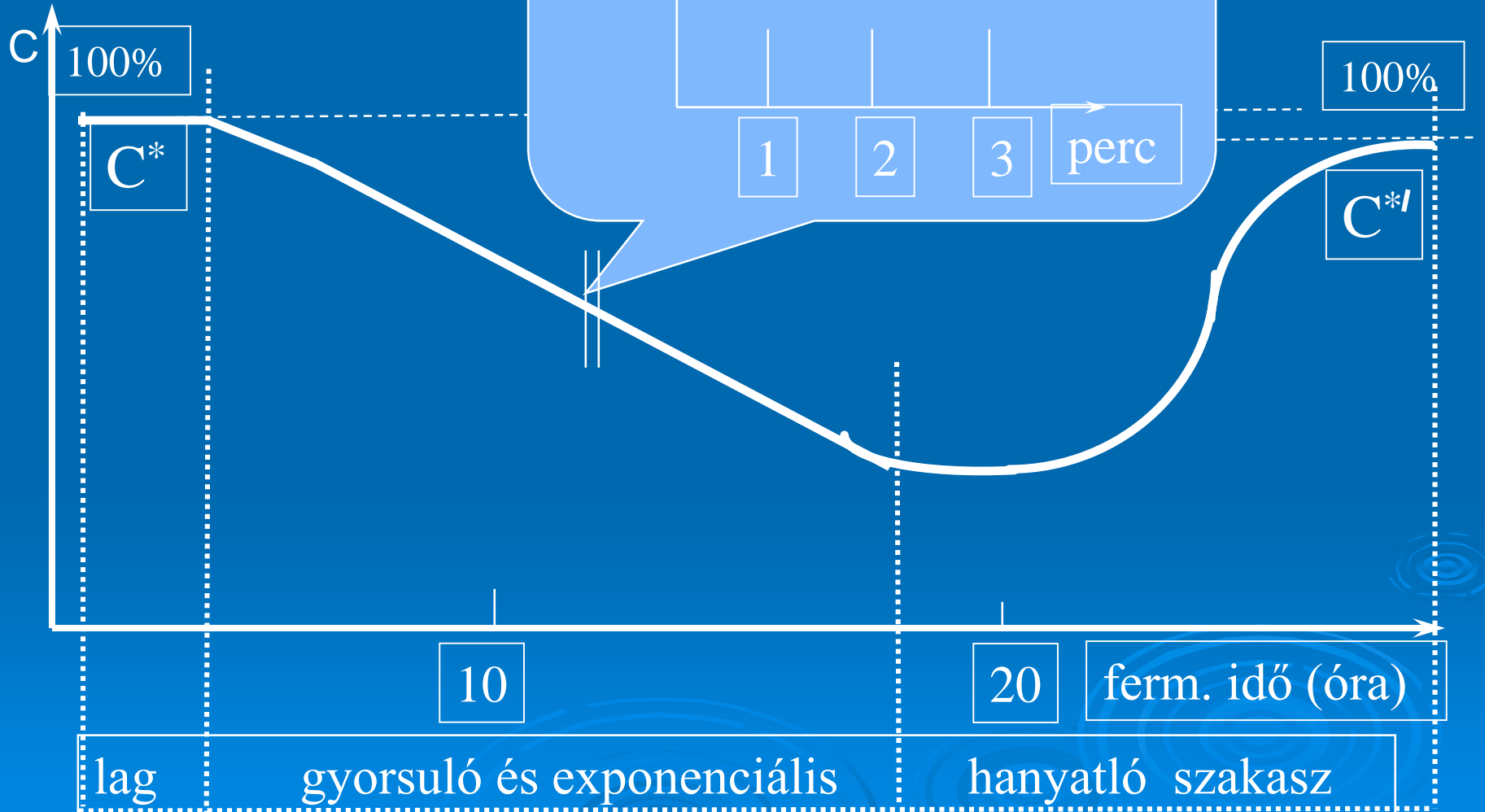
**BIZONYÍTÁS**

$$K_L a (C^* - C) > xQ$$

...HA...

$$K_L a (C^* - C) < xQ$$

Oldott oxigén szint  
% telítési érték



egyensúlyi C

100%

C  
100%

$C^*$

1

2

3

perc

$C^{*!}$

10

20

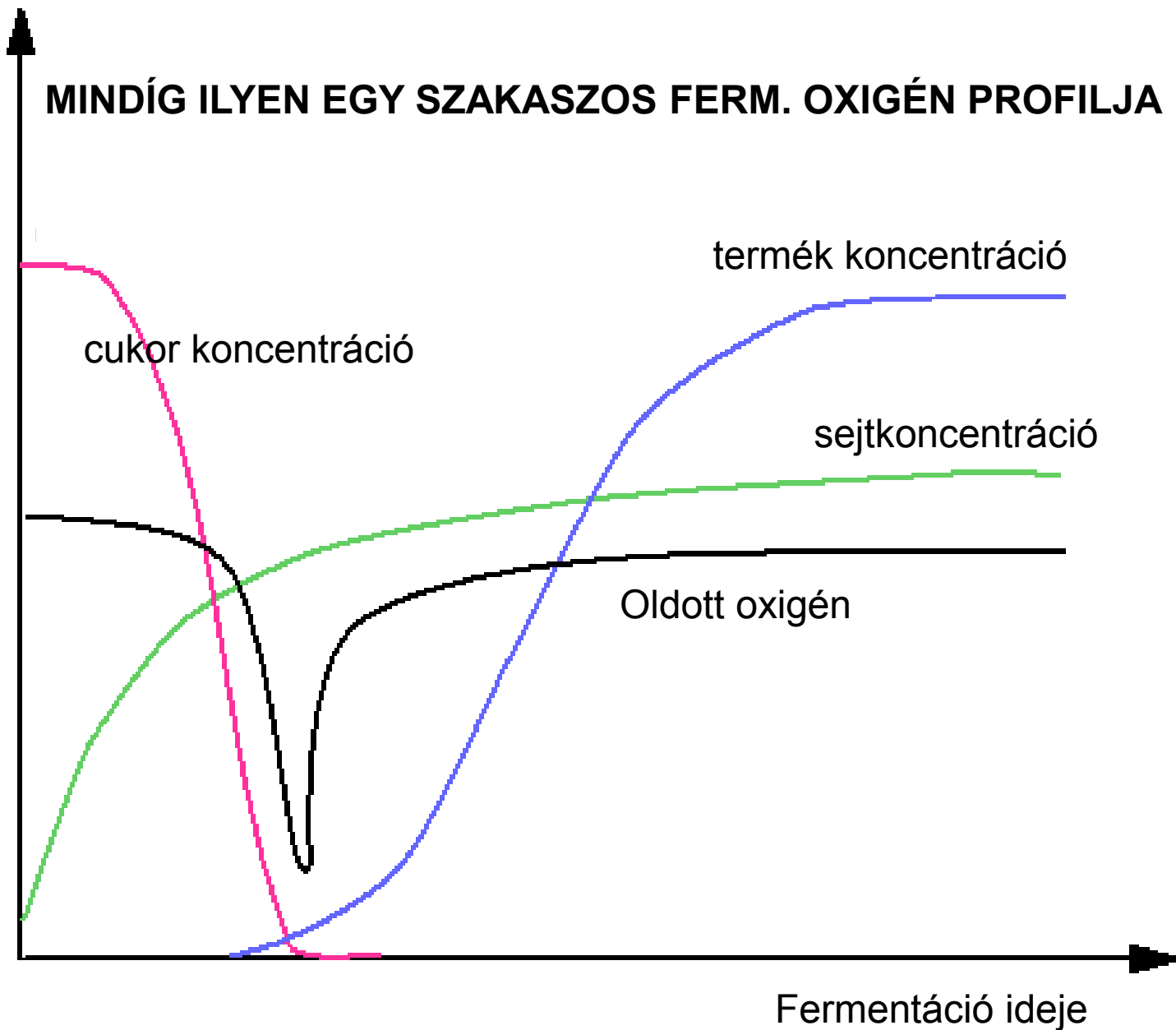
ferm. idő (óra)

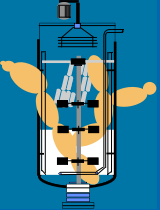
lag

gyorsuló és exponenciális

hanyatló szakasz

# MINDÍG ILYEN EGY SZAKASZOS FERM. OXIGÉN PROFILJA





# EMLÉKEZTETŐ: KÉT LIMITÁLÓ S SPECIÁLIS ESETE

$$r_x = \frac{dx}{dt} = \mu_{x \max} \frac{S C}{(K_S + S)(K_O + C)} x$$

$$r_S = \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}} r_x \quad \text{Szubsztrát fogyasztás}$$

$$r_O = \frac{dC}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/O}} r_x$$

C-forrás, oxigén

$$r_O = \frac{dC}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/O}} \mu_{x \max} \frac{SC}{(K_S + S)(K_O + C)} x + K_L a (C^* - C)$$

-Oxigén fogyasztás                      +oxigén telítés

Ha:  $\frac{dC}{dt} = 0$

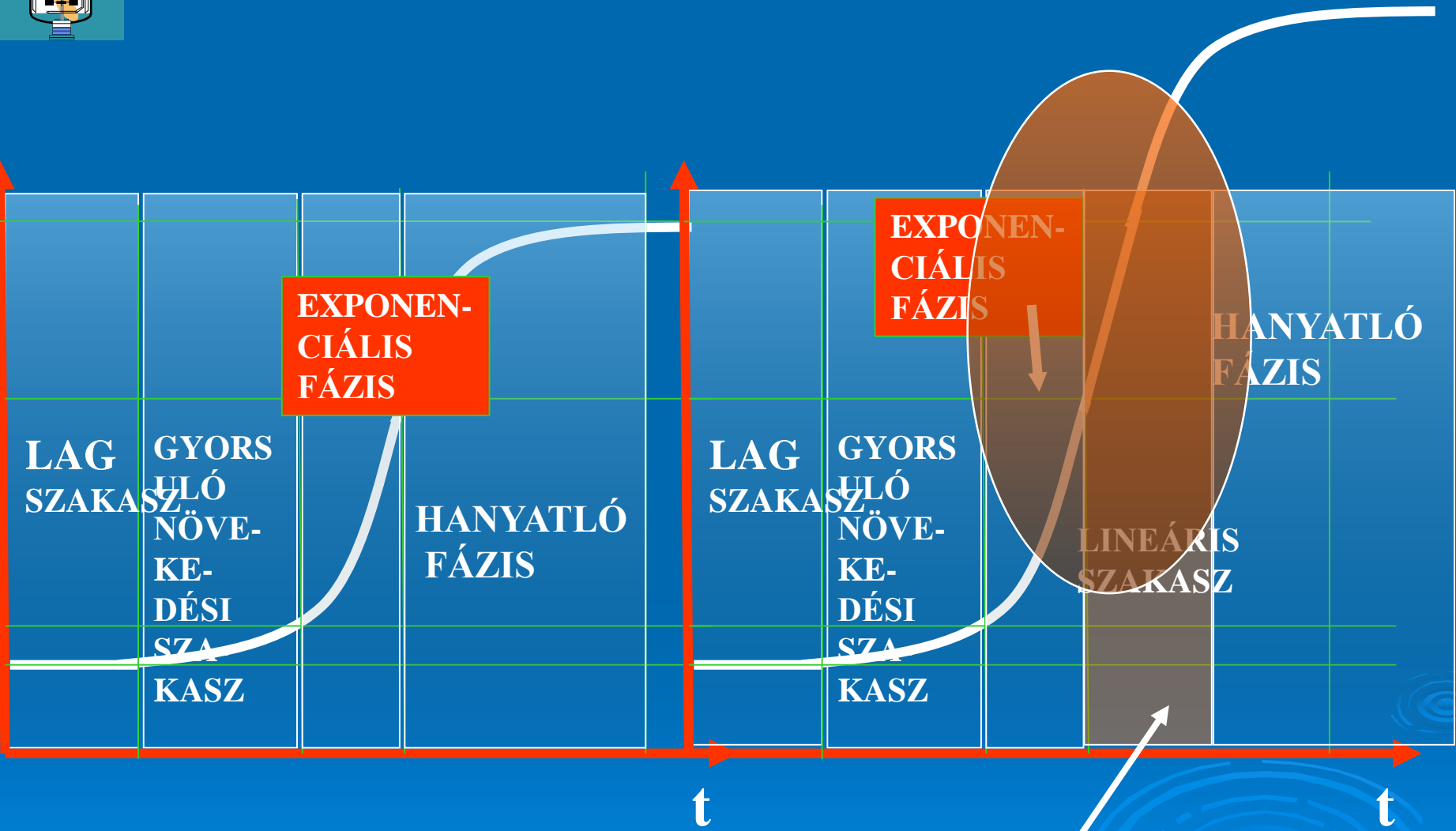
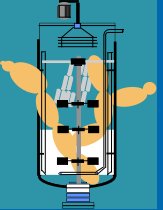
-Oxigén = oxigén  
fogyasztás    telítés

→  
/\*Y<sub>X/O</sub>

$$r_x = \frac{dx}{dt} \cong Y_{X/O} K_L a C^*$$

Lineáris növekedés

Az OTR határozza meg a NÖVEKEDÉS SEBESSÉGÉT



**EXPONEN-  
CIÁLIS  
FÁZIS**

**EXPONEN-  
CIÁLIS  
FÁZIS**

HANYATLÓ  
FÁZIS

LAG  
SZAKASZ

GYORS  
HÁLÓ  
NÖVE-  
KÉ-  
DÉSI  
SZAKASZ

HANYATLÓ  
FÁZIS

LAG  
SZAKASZ

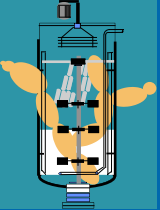
GYORS  
HÁLÓ  
NÖVE-  
KÉ-  
DÉSI  
SZAKASZ

LINEÁRIS  
SZAKASZ

t

t

Az oxigén beoldódással  
arányos a növekedés



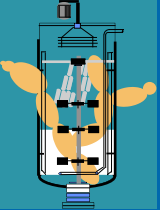
$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C) - xQ$$

Mitől függ és hogyan a telítési oxigén koncentráció,  $C^*$  ?

Mitől függ és hogyan a  $K_L$  ?

Mitől függ és hogyan az  $a$  ?

Mitől függ és hogyan a  $K_L a$  ?



## Mitől függ és hogyan a telítési oxigén koncentráció, $C^*$ ?

A telítési oxigén koncentráció függése a tenyésztési körülményektől

1. PARCIÁLIS NYOMÁS - Henry törvény :

$$C^* = \frac{1}{H} p_{O_2}$$

H - Henry-állandó [ bar/móltört; bar.dm<sup>3</sup>/mol; bar.dm<sup>3</sup>/mg ]

$p_{O_2}$  - oxigén parciális nyomása

(amely a  $C^*$  koncentrációjú oldattal egyensúlyt tartó légtérben lenne mérhető) [bar].

$C^*$  - telítési oxigén koncentráció, oldhatóság [mol/dm<sup>3</sup>; mg/dm<sup>3</sup>]

Hol van?

A teremben?

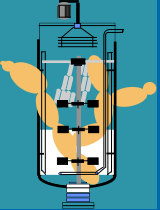
És a bioreaktorban?

2. HŐMÉRSÉKLET : C1-C1

$$\frac{d \ln H}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{\Delta G}{R}$$

T - a hőmérséklet (°K)

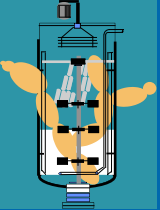
$\Delta G$  - az oxigén abszorpció hője (negatív=hőfelsz.)



Különböző gázok Henry-állandó értékei különböző hőmérsékleteken

Hőmérséklet		Henry- állandó *10 <sup>-4</sup> [bar/moltört]		
°C	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
0	5,29	0,073	2,55	
10	6,68	0,104	3,27	
20	8,04	0,142	4,01	
30	9,24	0,186	4,75	
40	10,40	0,233	5,35	
50	11,30	0,283	5,88	
60	12,0	0,341	6,29	



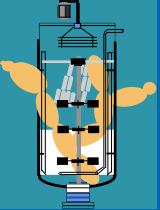


Wilhelm közelítése 1 bar nyomásra:

$$R \ln X = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT$$

X oxigén vagy a CO<sub>2</sub> moltörtje

	T(TARTOMÁNY)	A	B	C	D
OXIGÉN	274-348 °K	-286,94	15450,6	36,5593	0,0187662
SZÉN-DIOXID	273-353 °K	-317,66	17371,2	43,0607	-0,00219107



Cl-Cl egyenlet közelítő megoldása

$$C^* \cong \frac{A}{B + t}$$

Antoine

4-33 °C tartományban

$C^*$  - (mg/dm<sup>3</sup>)

$A = 468$      $B = 31,6$      $t$  - (°C).

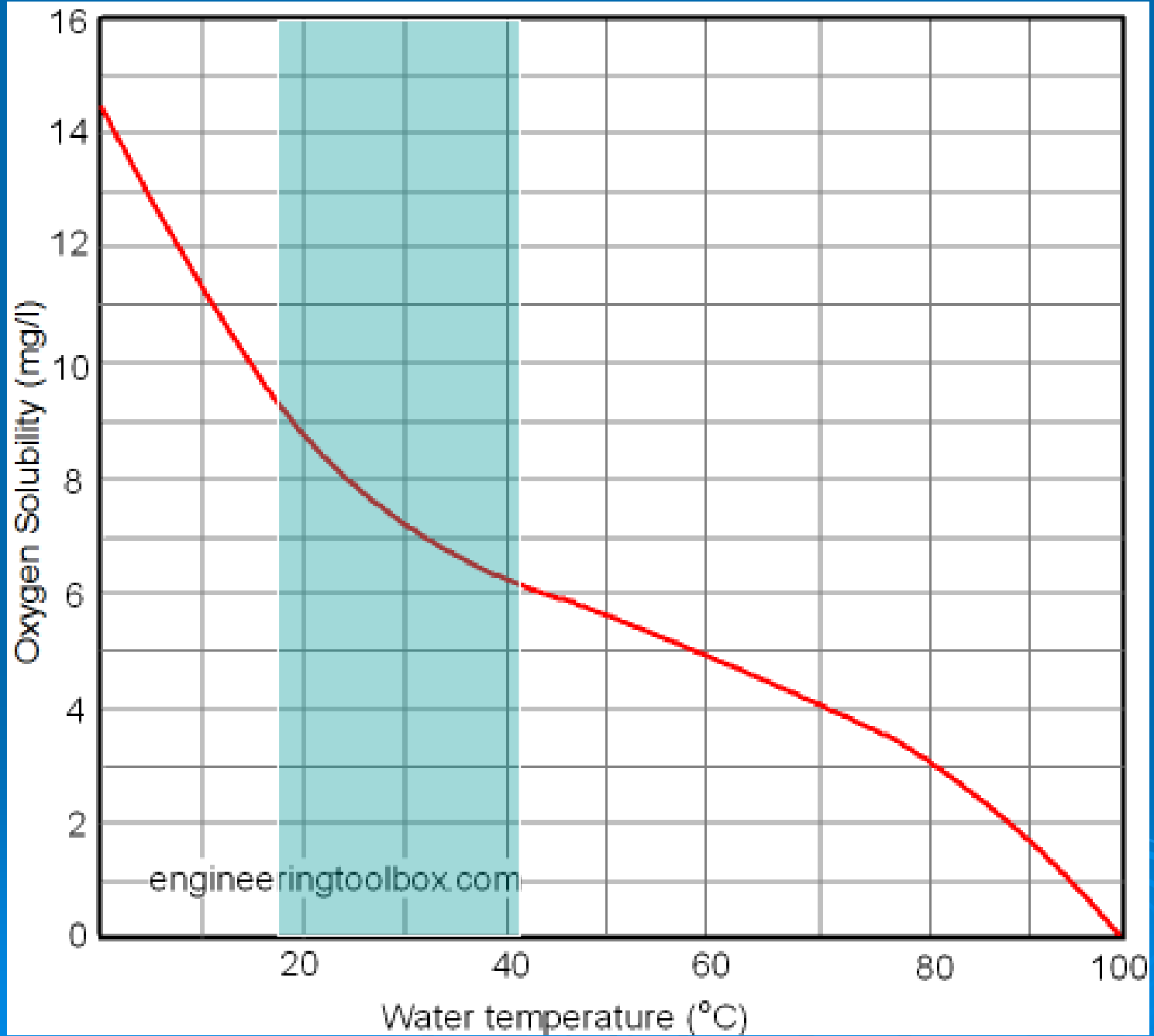
hatványsor közelítés  $C^*$  becslésére

$$C^* \cong 14,16 - 0,3943.t + 0,007714.t^2 - 0,0000646.t^3$$

$C^*$  - (mg/dm<sup>3</sup>)     $t$  - hőmérséklet (°C)

az oxigén  
oldhatósága csökken  
a hőmérséklet  
növekedésével. !!!!!

3 közelítés – 3 eredmény?



## 3. TÁPOLDAT ÖSSZETÉTELÉTŐL VALÓ FÜGGÉS

tiszta vízben elektrolitok hatása

*Setchenov,  
van Krevelen  
Hoftijzer,  
Dankwerts*

$$\lg \frac{C_0^*}{C^*} = \sum_i H_i I_i$$

$C_0^*$  - tiszta vízben

$C^*$  - adott elektrolit oldatban

$H_i$  - ionspecifikus kisózási állandók

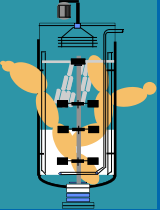
$I_i$  - az i-edik ionfajtaára vonatkozó

**ionerősség**

$$I_i = 0,5c_i z_i^2$$

$c_i$  - az i-edik ion molaritása (gion/dm<sup>3</sup>)

$z_i$  - az i-edik ion töltése.

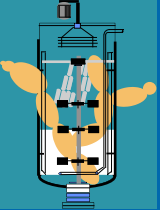

 Ionspecifikus állandók CO<sub>2</sub> és O<sub>2</sub> oldatára (25 °C)

**Kationok** H<sub>i</sub> (l.g-ion<sup>-1</sup>)

	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
H <sup>+</sup>	-0,774	-0,311
Na <sup>+</sup>	-0,550	-0,129
K <sup>+</sup>	-0,596	-0,198
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0,720	-0,264
Mg <sup>2+</sup>	-0,314	-0,079
Ca <sup>2+</sup>	-0,303	-0,071
Mn <sup>2+</sup>	-0,311	

**Anionok** H<sub>i</sub> (l.g-ion<sup>-1</sup>)

	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Cl <sup>-</sup>	0,844	0,340
Br <sup>-</sup>	0,820	0,324
I <sup>-</sup>	0,821	0,311
OH <sup>-</sup>	0,941	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,802	0,291
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,453	0,213
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,485	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,320	0,147



Szerves anyagok hatása az oxigén oldhatóságára

$$\lg \frac{C_o^*}{C_{szerv}^*} = kC_{szerv}$$

k ún. Setchenov-állandó és  
 $C_{szerv}$  szervesanyag koncentrációja a tápoldatban.

LINEÁRIS KÖZELÍTÉS

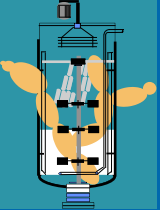
$$C_{szerv}^* = C_o^* (1 - mC_{szerv})$$

glükózza, laktózza, szaharózza

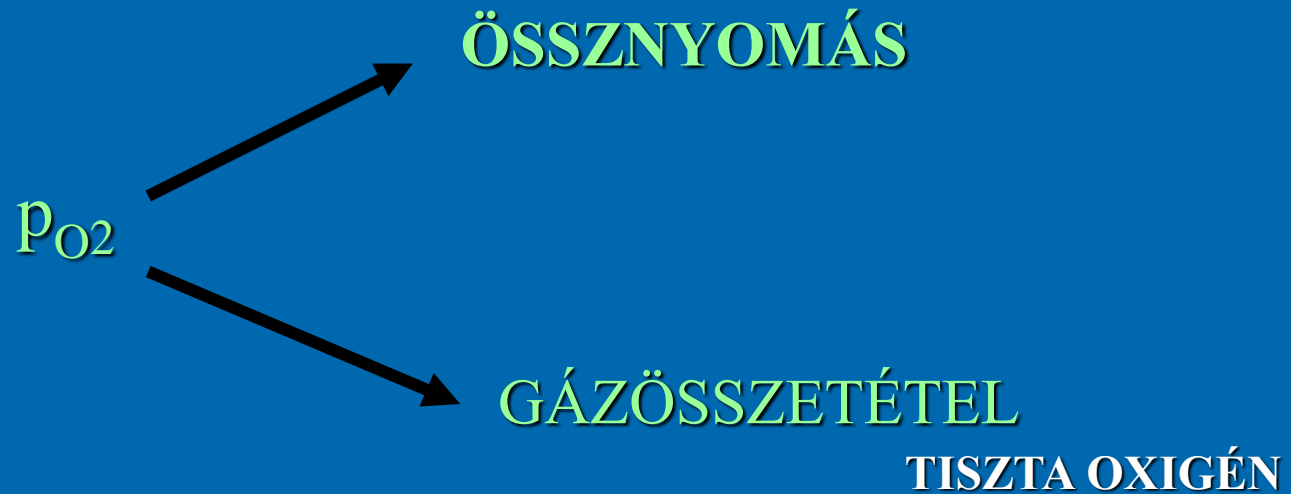
$$m = 0,0012 \text{ dm}^3/\text{g}$$

0-200 g/dm<sup>3</sup> cukor koncentrációig.

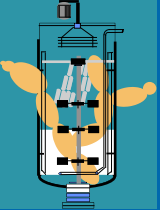
↓  
helyett található az irodalomban szaharózza 0,0009-es érték is  
(vagy  $K = 4,36 \cdot 10 \text{ dm}^3/\text{g}$ )



# MIVEL NÖVELHETŐ $C^*$ ÉRTÉKE?



~~HŐMÉRSÉKLET  
TÁPOLDATÖSSZETÉTEL~~



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

Mitől függ és hogyan a telítési oxigén koncentráció,  $C^*$  ? ✓

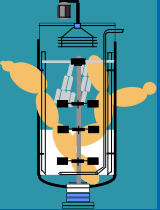
Mitől függ és hogyan a  $K_L$  ?

Mitől függ és hogyan az  $a$  ?

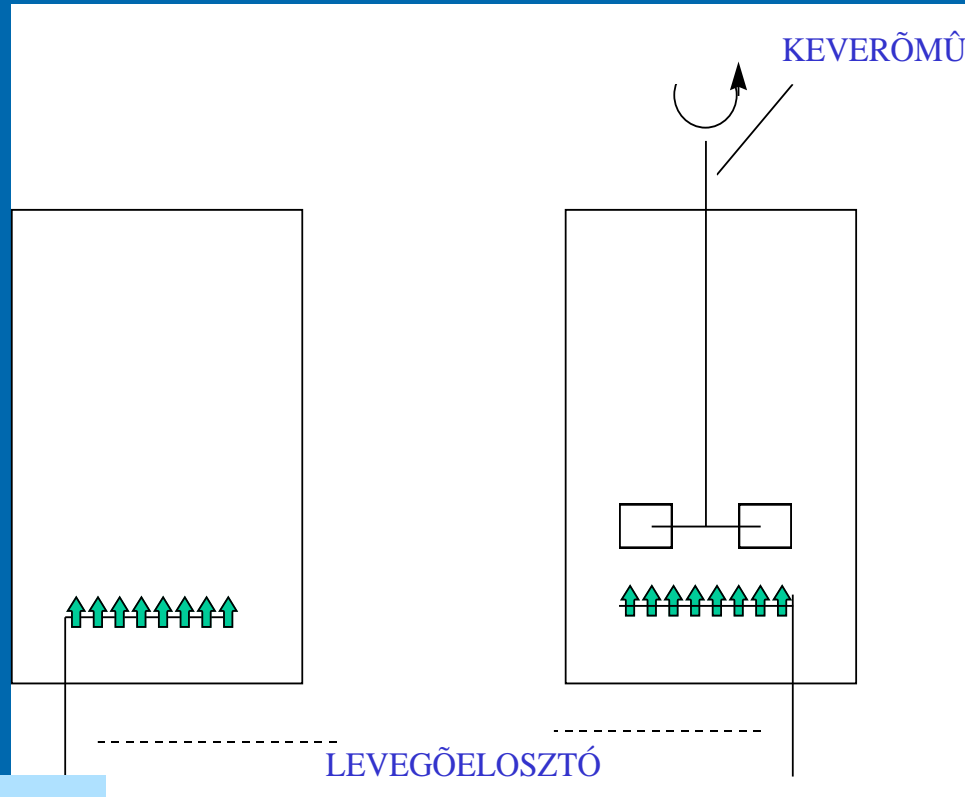
Mitől függ és hogyan a  $K_L a$  ?



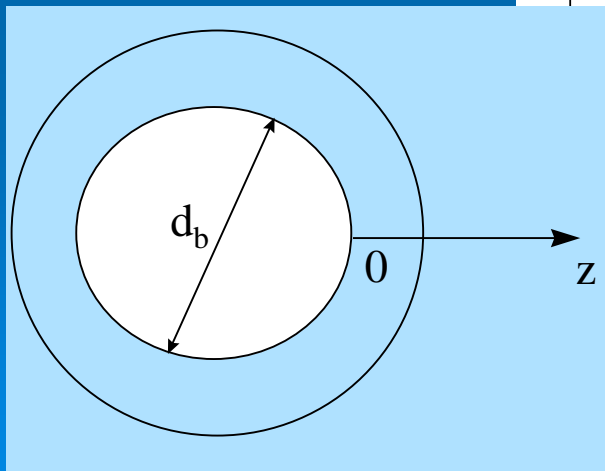




Nem kevert reaktorok



Kevert reaktorok

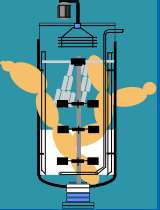


$$\frac{dC}{dt} = -D_{O_2} \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0}$$

$$dC/dt = k_L (C^* - C).$$

Fick-törvény a diffúzióra

Oxigén fluxus  
(egységnyi felületre  
jutó áttad seb.)



# LEVEGŐZTETÉS 3

BIM2  
2002

$$\frac{dC}{dt} = -D_{O_2} \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0}$$

$$dC/dt = k_L (C^* - C).$$

„megoldhatatlan” diff. Egy.

$$k_L = -\frac{1}{C^* - C} D_{O_2} \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0}$$

Megoldás közelítéséhez  
dimenziómentes forma:

$$\bar{C} = \frac{C}{C^*} \quad \text{és} \quad \bar{z} = \frac{z}{d_b}$$

$d_b$  buborék átmérő

dimenziómentes  
tömegátadási koefficiens  
Sherwood-szám

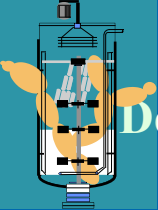
$$Sh = \frac{k_L d_b}{D_{O_2}} = -\frac{1}{1 - \bar{C}} \left( \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} \right)_{\bar{z}=0}$$

Megoldás alakja:

$$\bar{C} = f(\bar{z}, Sh, Sc, Gr)$$

$$Sh = g(Sc, Gr)$$





Definíció, értelmezés

Általános  
összefüggés

Oxigénátadáshoz  
használt alak

## REYNOLDS-SZÁM

$$Re = \frac{\text{tehetetlenségi erők}}{\text{belső súrlódási (viszkózus) erők}} = \frac{d_b v_b \rho_1}{\mu_1}$$

## PECLET-SZÁM (=Bs)

$$Pe = \frac{\text{konvektív komponenesáram}}{\text{konduktív komponensáram}} = \frac{d_b v_b}{D_{O_2}}$$

## SCHMIDT-SZÁM

$$Sc = \frac{\text{momentum diffuzivitás}}{\text{tömeg diffuzivitás}} = \frac{\mu}{\rho D}$$

## FROUDE-SZÁM

$$Fr = \frac{\text{centrifugális erő}}{\text{gravitációs erő}} = \frac{v^2}{gL}$$

## GRASHOF-SZÁM

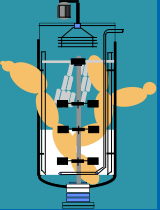
(Archimédesz-szám)

$$Gr = \frac{\text{felhajtóerő}}{\text{belső súrlódási erő}} = \frac{d_b^3 \rho g \Delta \rho}{\mu^2} = \frac{d_b^3 \rho_1 g (\rho_1 - \rho_g)}{\mu_1^2}$$

## SHERWOOD-SZÁM

(dimenziómentes  
anyagátadási tényező)

$$Sh = \frac{\text{buborékátmérő}}{\text{filmátmérő}} = \frac{kd}{D} = \frac{k_1 d_b}{D_{O_2}}$$


Példák  $k_1$  becslésére

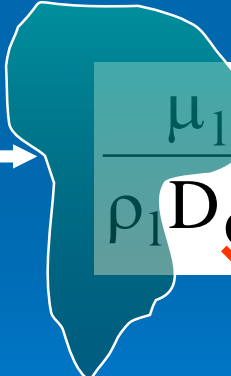
1. Különállóan felszálló, merev határfelületű (nem forgó) gázbuborékok (igen kicsiny buborékok, felületaktív anyagok, légbuborékok felszállási sebessége igen kicsi)



$Re < 1$  és  $Pe \gg 1$   
dugóáram

$$Sh = 1,01 \cdot Pe^{\frac{1}{3}} = 1,01 \cdot \left( \frac{v_b d_b}{D_{O_2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

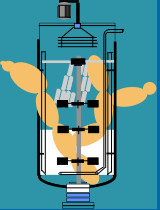

$$Pe = \frac{v_b d_b \gg 1}{D_{O_2}} \gg 1 \gg \frac{v_b \rho_1 d_b}{\mu_1} = Re$$


$$\frac{\mu_1}{\rho_1 D_{O_2}} = Sc \gg 1$$

$$Sh = g(Sc, Gr) ?$$

$$v = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$



$$\text{Sh} = 1,01 \cdot \text{Pe}^{\frac{1}{3}} = 1,01 \cdot \left( \frac{v_b d_b}{D_{O_2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$V_b$  változik  $\Rightarrow$   
 $V_t$  (terminális)

Hagen-Poiseuille-egyenlet (bub.seb.):

 állandó

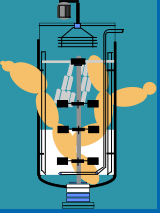
$$v_t = \frac{d_b^2 \Delta \rho g}{18 \mu}$$

$$\text{Sh} = 1,01 \left( \frac{d_b^3 \Delta \rho g}{18 \mu D_{O_2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh} = 1,01 \left( \frac{d_b^3 \rho \Delta \rho g}{18 \mu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\rho D_{O_2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,39 \text{Gr}^{\frac{1}{3}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh} = 1,01 \text{Pe}^{\frac{1}{3}} = 0,39 \text{Gr}^{\frac{1}{3}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}} = 0,39 \text{Ra}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Sh} = g(\text{Sc}, \text{Gr}) \cdot v$$



2. **CALDERBANK és MOO-YOUNG** A legtöbb laboratóriumi és ipari levegőztetett reaktorban a buborékok csoportokban, fürtökben mozognak fel vagy/és le,  
a buborékok egymással is **kölcsönhatásban** vannak (hatnak egymás mozgására.  
((egyenként, egymástól függetlenül felszálló buborékok esete a valóságban ritka))

$$d_b < 2,5 \text{ mm}$$

$$Sh = \frac{k_L d_b}{D_{O_2}} = 0,31 Gr^{\frac{1}{3}} Sc^{\frac{1}{3}}$$

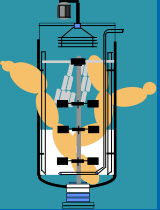
hidrofil anyagok  
kicsiny kyukak  
(szinterezett, buborékkolonnák)

$$d_b > 2,5 \text{ mm}$$

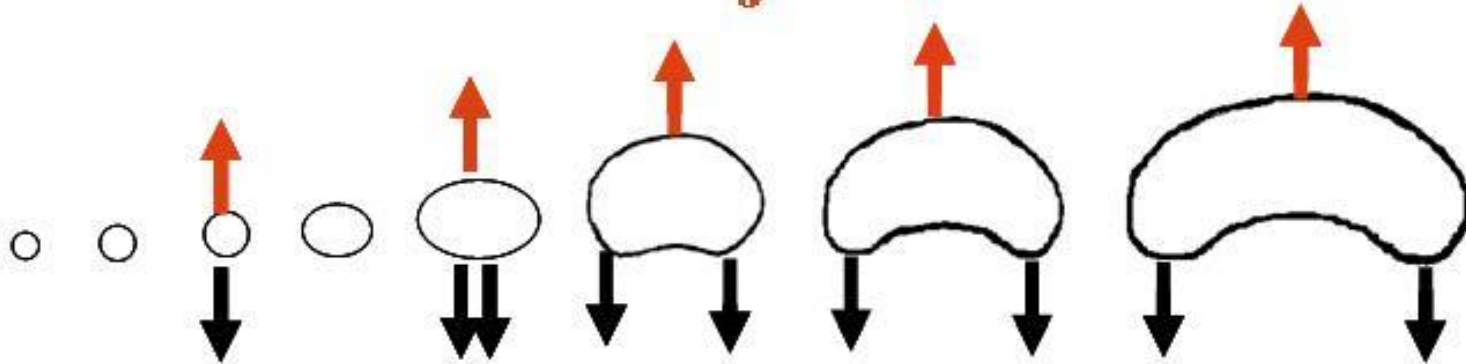
$$Sh = \frac{k_L d_b}{D_{O_2}} = 0,42 Gr^{\frac{1}{3}} Sc^{\frac{1}{2}}$$

tiszta víz  
szitatányér

Mi a minőségi különbség a kis és nagy buborékok között?



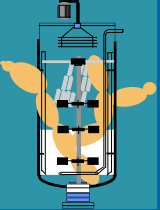
**Felhajtóerő**



**Viszkózus visszatartó erő**

$d_b$  buborék átmérő nő

Tehát  $K_f$  becslése nehéz, pl.: -buborék méret ELOSZLÁS  
(fotó v. fényszórás)  
-buborék sebesség



$$Sh = \frac{k_L d_b}{D_{O_2}} = 0,31 Gr^{\frac{1}{3}} Sc^{\frac{1}{3}}$$

Ha álló buborék van

$$Sh=0 \longrightarrow k_1 = 0$$

=>CALDERBANK és MOO-YOUNG MÓDOSÍTÁS:

Pedig nem igaz, mert van Hajtóerő

$$Sh = \frac{k_L d_b}{D_{O_2}} = 2 + 0,31 Gr^{\frac{1}{3}} Sc^{\frac{1}{3}}$$

ROSSZ A 340  
EGYENLET!!!  
(Régi Jegyzet)

$$k_L = \frac{2D_{O_2}}{d_b} > 0$$

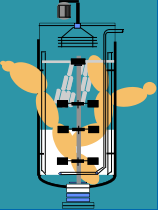
~KÉTFILMELMÉLET  
(Nerst)

$$k_1 = \frac{D_{O_2}^{folyadék}}{\delta_l}$$

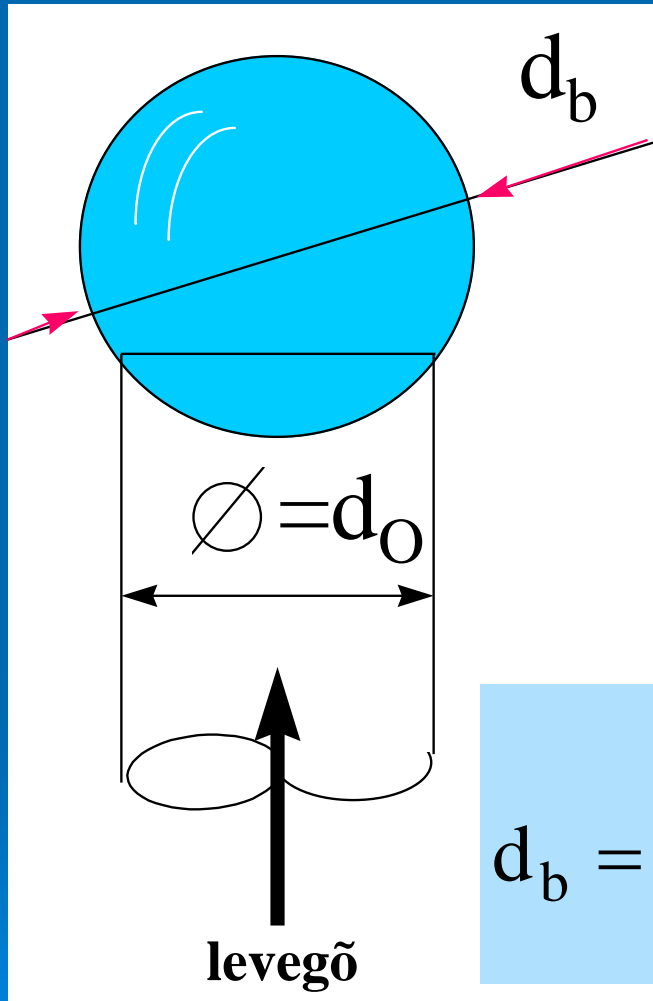


$$\delta_l = d_b / 2$$





Az anyagátadási felület  $a$  becslése - kevésbé empirikus



A buborék születésekor egyensúly van a felhajtóerő és a lyukkerületen a felületi feszültség által okozott visszatartó erő között:

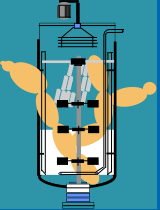
$$V_g \frac{d_b^3 \pi \Delta \rho g}{6} = \pi d_o \sigma$$

$\sigma$  a felületi feszültség.

$$d_b = \left( \frac{6 \sigma d_o}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad f_{\text{egy buborék}} = \pi d_b^2$$

Jegyzet: 4.33 táblázat

Mennyi buborék van egyidejűleg rendszerben?



## LEVEGŐZTETÉS 3

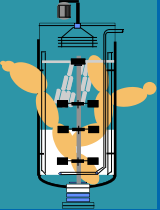
Mennyi buborék van egyidejűleg rendszerben? Függs a tartózkodási időtől

$$t_b = \frac{H_L}{v_b}$$

$H_L$  - folyadék magasság  
 $v_b$  - buborék sebesség.

$v_b$  nem állandó,  
változik, miközben a buborék a  
lyuktól a felszín felé halad.  
Jó közelítésként a buborék  
végsebességet ( a folyadék felszínén  
történő szétpattanáskor) szokás  
figyelembe venni.

$$v_t = \frac{d_b^2 \Delta \rho g}{18 \mu}$$



n db lyuk  
q lyukankénti  
légseb.

$$a = \frac{1}{V} nqt_b$$

teljes buboréktérfogat a  
reaktorban

egy buborék felülete

$$\frac{\pi d_b^2}{\pi d_b^3} = \frac{nqt_b}{V} \frac{6}{d_b}$$

$H_0$ : hold up

egy buborék térfogata

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

egy buborék fajlagos felülete

GÁZVISSZATARTÁS = Hold up =

GÁZTÉRFOGAT

ÖSSZTÉRFOGAT

Videó: Jegyzet 4.3. videó

Hogyan lehet ,a'-t növelni?

$H_0$  növelése: q nő;  $H_{\text{folyadék}}$  nő  
 $V_{\text{reaktor}}$  csökken; +keverés  $\rightarrow$   $t_b$  nő

$d_b$  csökkent – lyuk  
+keverés

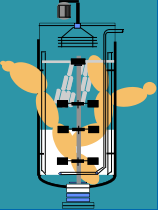
$$\left( \text{GÁZVISSZATARTÁS}' = \text{Hold up}' = \frac{\text{GÁZTÉRFOGAT}}{\text{Folyadéktérfogat}} = H' \right)$$

Egyes forrásokban:

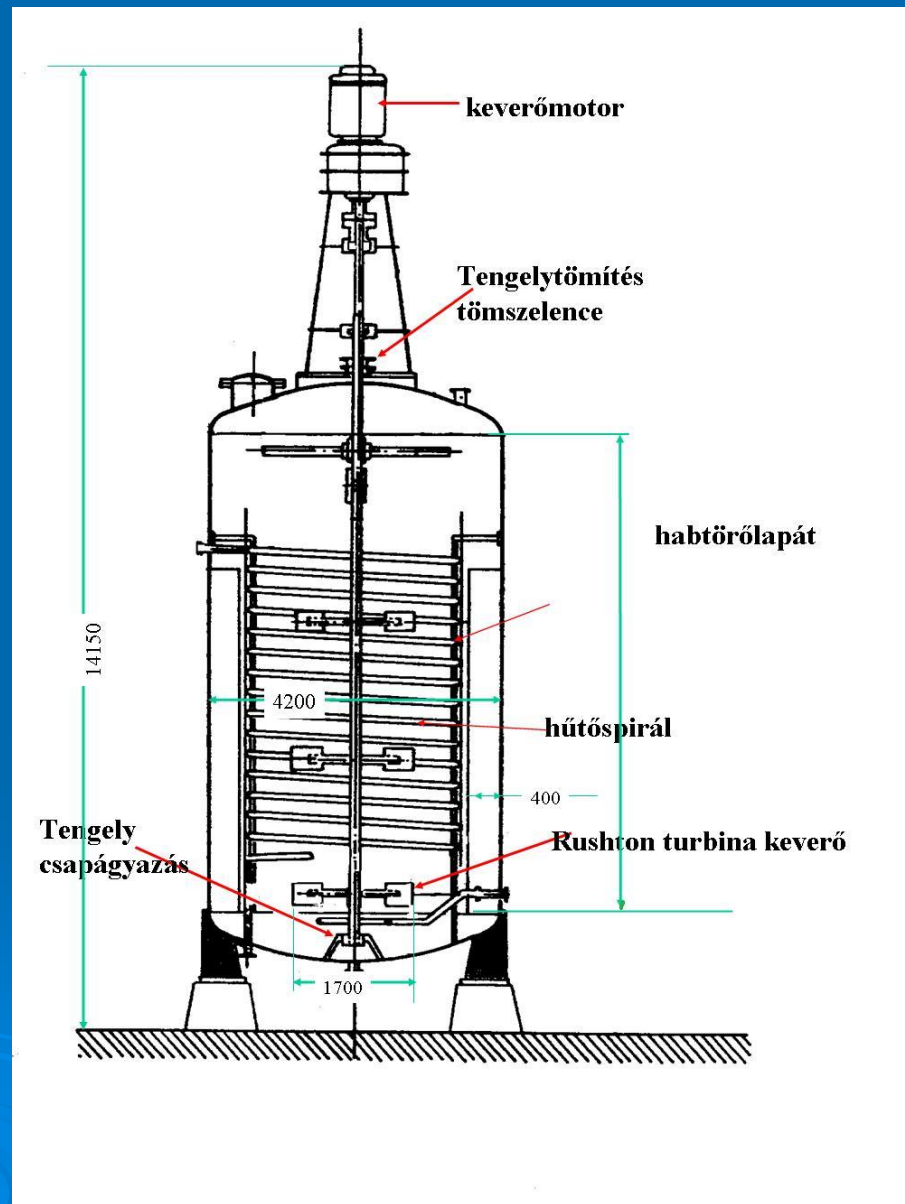
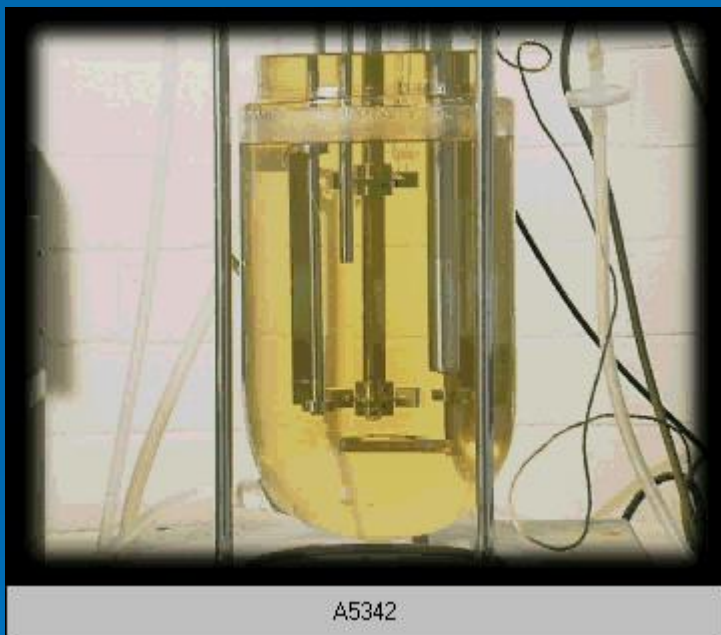
$$H_0 = \frac{H'}{H' + 1}$$

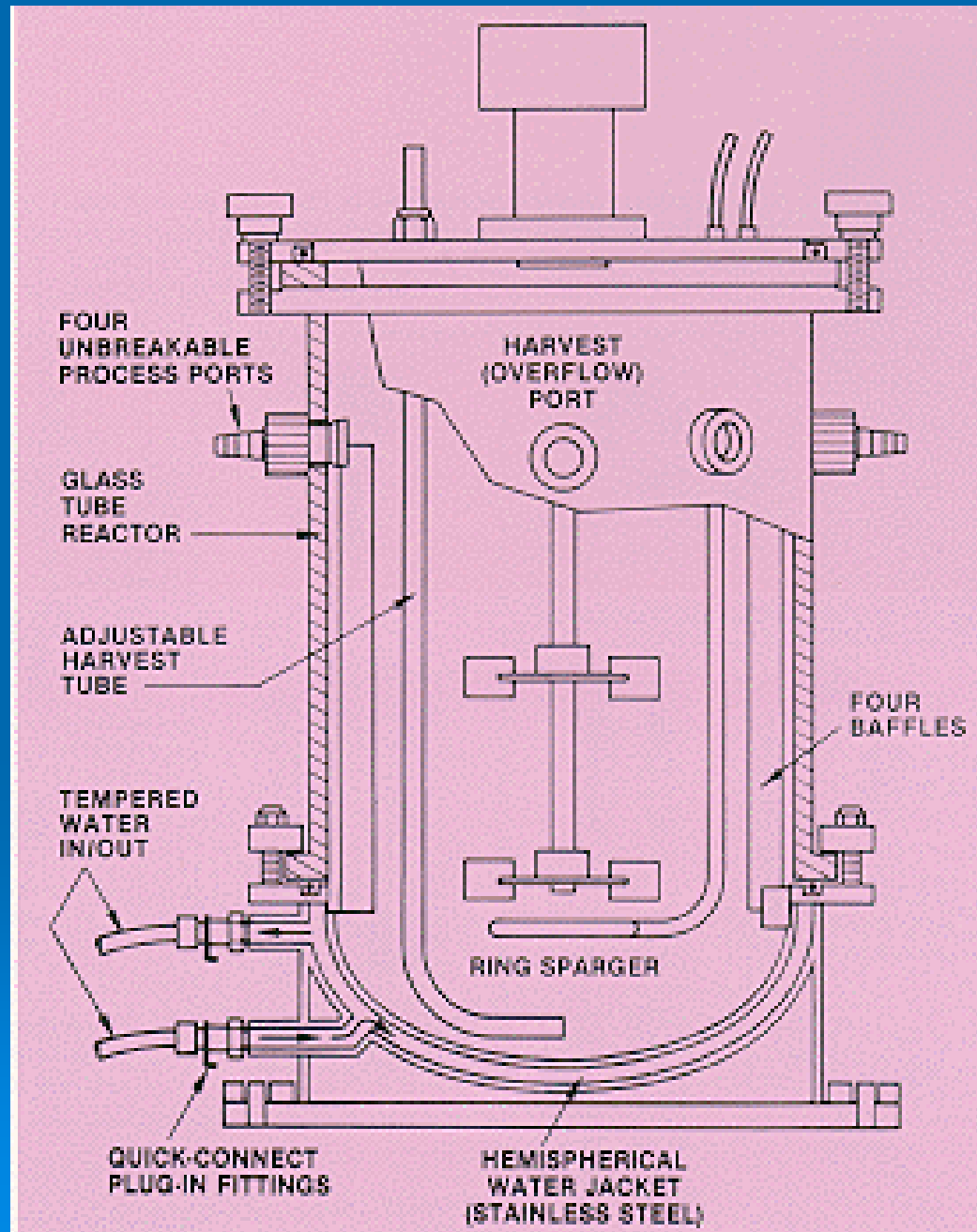
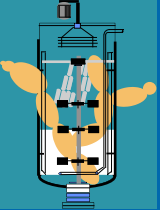
$$a = \frac{H'}{H' + 1} \frac{6}{d_b}$$

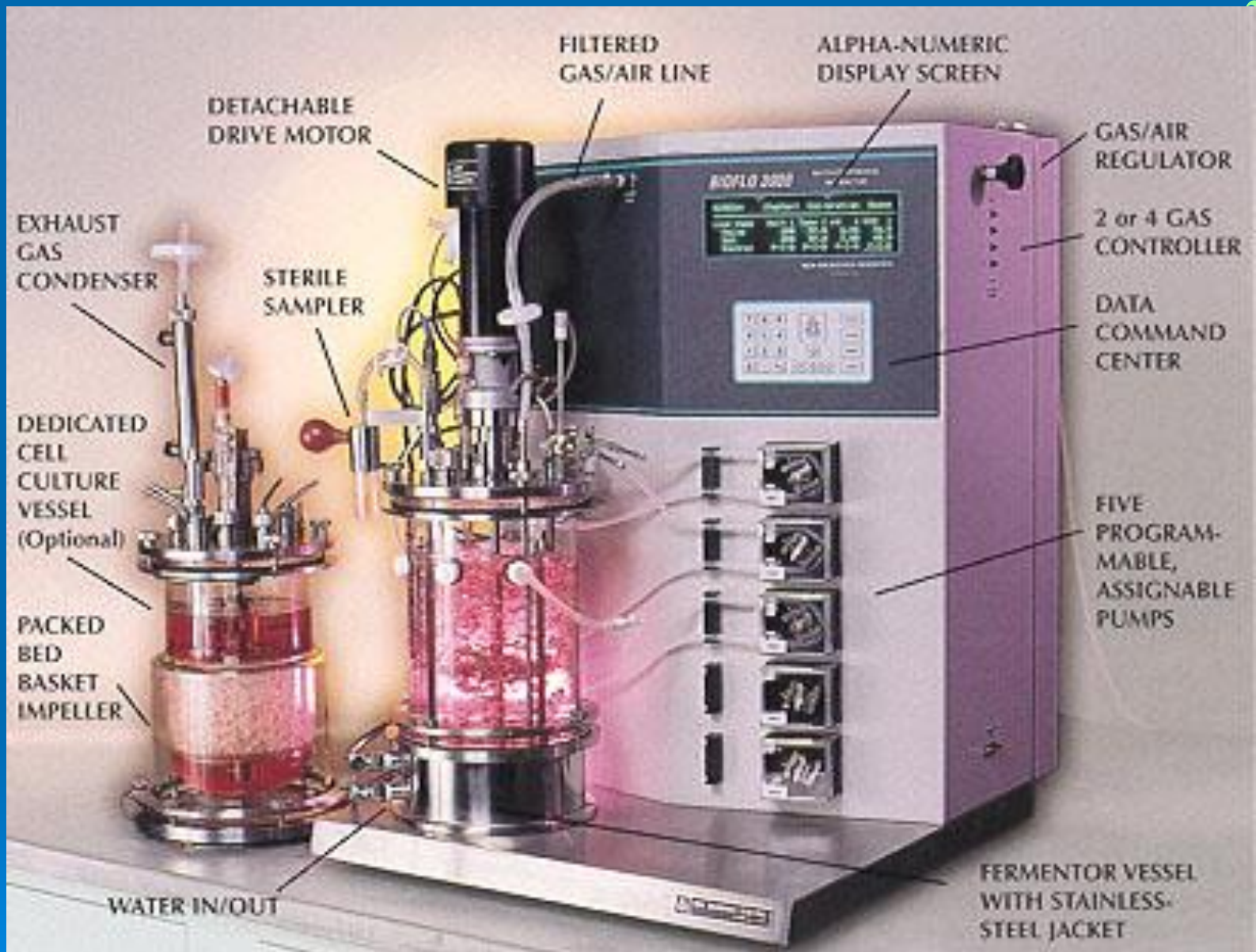
$$H_0 = \frac{h_{lev} - h_{nemlev}}{h_{lev}}$$

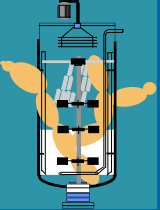


## Oxigénátadás kevert reaktorban









## LEVEGŐZTETÉS 3

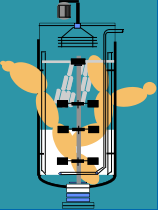
BIM2  
2002

MSG, JAPÁN  
HOFU



63420 GALLON  
100 FEET





A keverés szerepe, funkciói:

-(mozgási)energiabevitel a folyadékba

MOZGATÁS  
HŐ

P/V

$K_L a$

-a levegőztető gáz diszpergálása a folyadékban

BUBORÉKKÉPZÉS, ANYAGÁTADÁS

-a gáz- és folyadékfázis elválasztása

FORDÍTOTT A.ÁTADÁS

$\text{CO}_2$

-a fermentlé oldott és nem oldott komponenseinek jó elkeverése

ÁLTALÁNOS KEVEREDÉSI FUNKCIÓ

szubsztrátok, termékek...