

PILOT-POSTROJENJA I PROJEKTIRANJE
POSTUPAKA PROČIŠĆAVANJA VODA

**FAKULTET KEMIJSKOG
INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**

ZAVOD ZA OPĆU I ANORGANSKU KEMIJU

Nastavnik:

Dr. sc. Laszlo SIPOS, red. prof.

Suradnici:

Marinko MARKIĆ, dipl. inž.

Mr. sc. Tamara ŠTEMBAL, dipl. inž.

Nataša ZUBER, dipl. inž.

Iva NOVAK, dipl. inž.

Mr. sc. Lidija FURAČ, dipl. inž.

Mr. sc. Željko KOVAČEVIĆ, dipl. inž.

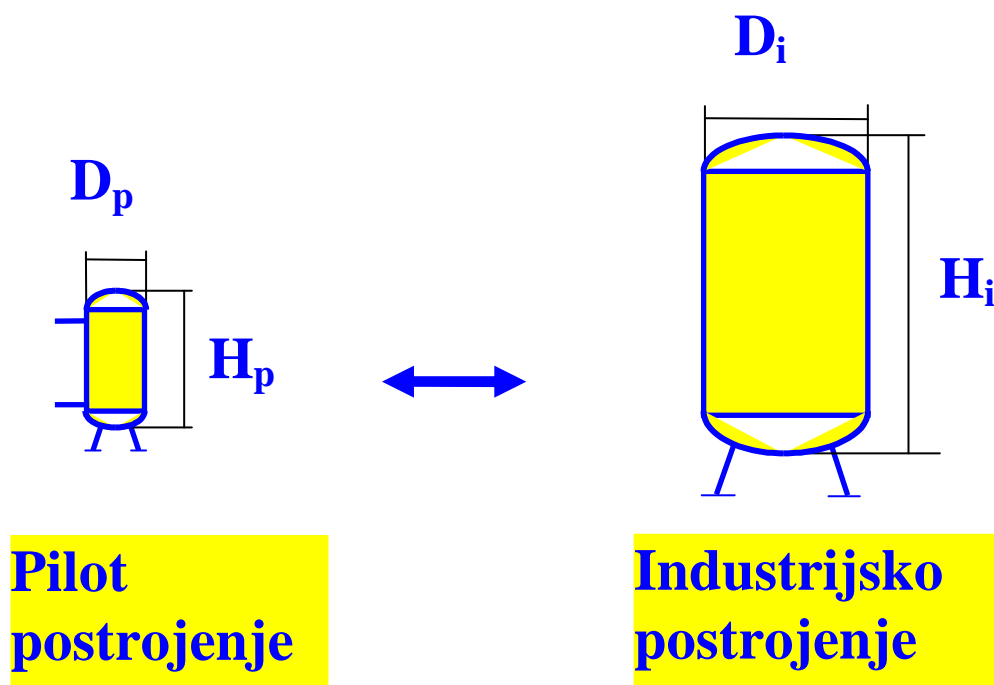
Irena BRATELJ, dipl. inž.

Tatjana Ignjatić Zokić, dipl. inž.

Nikša ZOKIĆ, tehn. sur.

PILOT-POSTROJENJA ILI
POLUINDUSTRIJSKA POSTROJENJA
SU UMANJENE KOPIJE POSTOJEĆIH ILI
ZAMIŠLJENIH INDUSTRIJSKIH
POSTROJENJA, A OMOGUĆAVAJU
ODVIJANJE ODREĐENIH FIZIČKIH,
FIZIČKO-KEMIJSKIH, KEMIJSKIH I
BIOLOŠKIH PROCESA POD UVJETIMA
SLIČNIM U INDUSTRIJSKIM POSTRO-
JENJIMA.

PRENOŠENJE PROCESA U VEĆE MJERILO
"SCALE-UP"



$$H_p * r = H_i$$

- Geometrijska sličnost

Vanjska geometrijska sličnost

$$H_i/H_p = D_i/D_p = r$$

Unutrašnja geometrijska sličnost

$$H_p/D_p = H_i/D_i = k_l$$

- Fizikalna sličnost

$$\rho_{p1}/\rho_{p2} = \rho_{i1}/\rho_{i2} = k_\rho$$

- Kinetička sličnost
- Dinamička sličnost
- Kemijska sličnost
- Biološka sličnost
- Toplinska sličnost

- Potpuna sličnost

- Djelomična sličnost

Veliki broj funkcionalno povezanih varijabli komplicira problem prenošenja u veće mjerilo.

Iz raznih fizikalnih veličina treba definirati bezdimenzionalne veličine kao kriterij sličnosti.

BUCKINGHAMOV teorem:

$$A = f(B_1, B_2, \dots, B_n)$$

$$f(A, B_1, B_2, \dots, B_n) = 0$$

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$$

$$\pi_1 = (A)^{a_1} * (B_1)^{b_1} * (B_2)^{c_1} * \dots$$

$$\pi_2 = (A)^{a_2} * (B_1)^{b_2} * (B_2)^{c_2} * \dots$$

:

$$\pi_m = (A)^{a_m} * (B_1)^{b_m} * (B_2)^{c_m} * \dots$$

$$m = n + 1 - k$$

gdje je:

A - ovisna varijabla

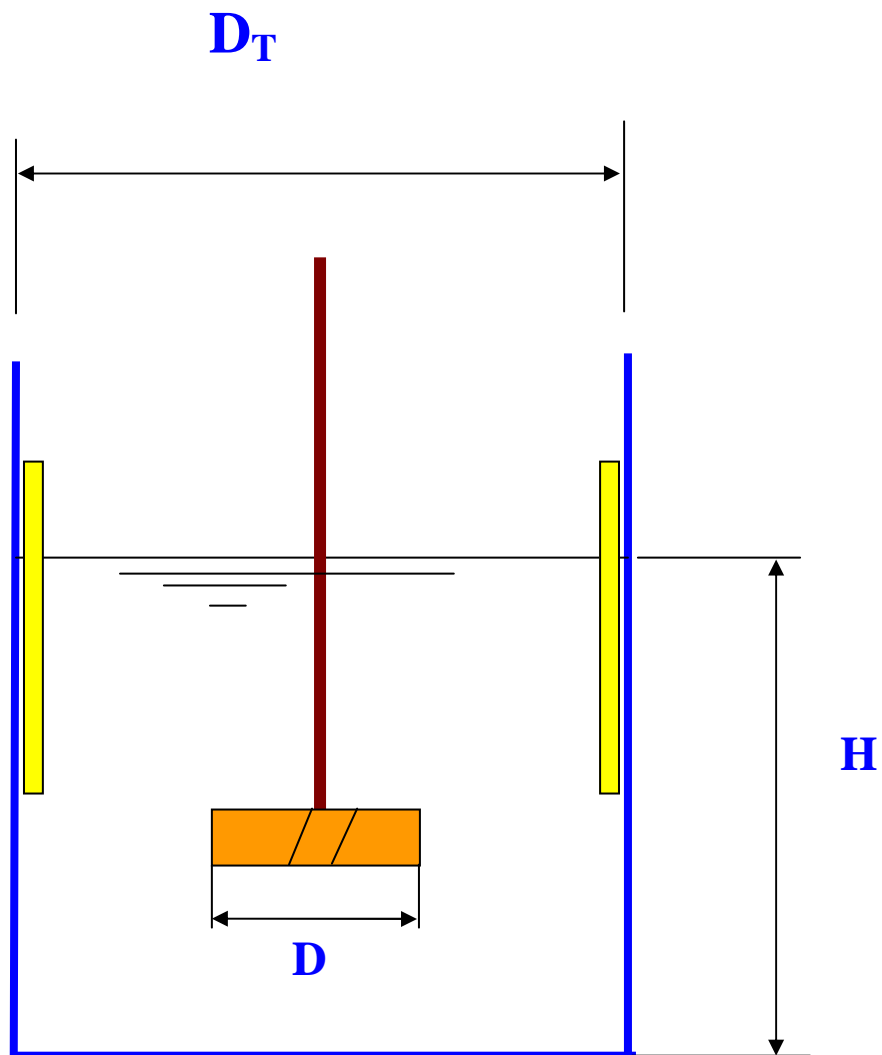
B - neovisna varijabla

π - bezdimenzionalne veličine

n - broj neovisnih varijabli

k - broj neovisnih dimenzija

m - broj bezdimenzionalnih veličina



MIJEŠALICA

- D** - Promjer miješalice
- D_T** - Promjer spremnika
- H** - Visina tekućine

$$P = f(\mu, \rho, N, g, D, D_T, \dots)$$

$$f(P, \mu, \rho, N, g, D, D_T, \dots) = 0$$

Snaga	P	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$	$\text{M L}^2 \text{T}^{-3}$
Viskozitet	μ	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$\text{M L}^{-1} \text{T}^{-1}$
Gustoća	ρ	kg m^{-3}	M L^{-3}
Broj okretaja	N	s^{-1}	T^{-1}
Ubrzanje teže	g	m s^{-2}	L T^{-2}
Promjer mješalice	D	m	L
Promjer spremnika	D_T	m	L

Broj neovisnih varijabli: $n = 6$

Broj neovisnih dimenzija: $k = 3$

Broj bezdimenzionalnih veličina:

$$m = n + 1 - k = 6 + 1 - 3 = 4$$

$$\pi_1 = (\rho)^{k1} * (\mathbf{N})^{k2} * (\mathbf{D})^{k3} * (\mathbf{P})^1$$

$$\pi_2 = (\rho)^{k4} * (\mathbf{N})^{k5} * (\mathbf{D})^{k6} * (\mu)^1$$

$$\pi_3 = (\rho)^{k7} * (\mathbf{N})^{k8} * (\mathbf{D})^{k9} * (\mathbf{g})^1$$

$$\pi_4 = (\rho)^{k10} * (\mathbf{N})^{k11} * (\mathbf{D})^{k12} * (\mathbf{D}_T)^1$$

$$\pi_1 = (\rho)^{k_1} * (\mathbf{N})^{k_2} * (\mathbf{D})^{k_3} * (\mathbf{P})^1$$

$$\pi_1 = (\mathbf{M} \mathbf{L}^{-3})^{k_1} * (\mathbf{T}^{-1})^{k_2} * (\mathbf{L})^{k_3}$$

$$* (\mathbf{M} \mathbf{L}^2 \mathbf{T}^{-3})^1 = \mathbf{M}^0 \mathbf{L}^0 \mathbf{T}^0$$

$$\mathbf{M}: 0 = k_1 + 1$$

$$\mathbf{L}: 0 = -3k_1 + k_3 + 2$$

$$\mathbf{T}: 0 = -k_2 - 3$$

$$k_1 = -1$$

$$k_2 = -3$$

$$k_3 = -5$$

$$\pi_1 = \mathbf{P}/\rho \mathbf{N}^3 \mathbf{D}^5$$

$$\pi_2 = (\rho)^{k_4} * (\mathbf{N})^{k_5} * (\mathbf{D})^{k_6} * (\mu)^1$$

$$\pi_2 = (\mathbf{M} \mathbf{L}^{-3})^{k_4} * (\mathbf{T}^{-1})^{k_5} * (\mathbf{L})^{k_6}$$

$$* (\mathbf{M} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{T}^{-1})^1 = \mathbf{M}^0 \mathbf{L}^0 \mathbf{T}^0$$

$$\mathbf{M}: 0 = k_4 + 1$$

$$\mathbf{L}: 0 = -3k_4 + k_6 - 1$$

$$\mathbf{T}: 0 = -k_5 - 1$$

$$k_4 = -1$$

$$k_5 = -1$$

$$k_6 = -2$$

$$\pi_2 = \mu/\rho \mathbf{N} \mathbf{D}^2$$

$$\pi_3 = (\rho)^{k7} * (\mathbf{N})^{k8} * (\mathbf{D})^{k9} * (\mathbf{g})^1$$

$$\pi_3 = (\mathbf{M} \mathbf{L}^{-3})^{k7} * (\mathbf{T}^{-1})^{k8} * (\mathbf{L})^{k9}$$

$$* (\mathbf{L} \mathbf{T}^{-2})^1 = \mathbf{M}^0 \mathbf{L}^0 \mathbf{T}^0$$

$$\mathbf{M}: 0 = k7$$

$$\mathbf{L}: 0 = -3k7 + k9 + 1$$

$$\mathbf{T}: 0 = -k8 - 2$$

$$k7 = 0$$

$$k8 = -2$$

$$k9 = -1$$

$$\pi_3 = \mathbf{g} / \mathbf{N}^2 \mathbf{D}$$

$$\pi_4 = (\rho)^{k10} * (\mathbf{N})^{k11} * (\mathbf{D})^{k12} * (\mathbf{D}_T)^1$$

$$\pi_4 = (\mathbf{M} \mathbf{L}^{-3})^{k10} * (\mathbf{T}^{-1})^{k11} * (\mathbf{L})^{k12}$$

$$* (\mathbf{L})^1 = \mathbf{M}^0 \mathbf{L}^0 \mathbf{T}^0$$

$$\mathbf{M}: 0 = k10$$

$$\mathbf{L}: 0 = -3k10 + k12 + 1$$

$$\mathbf{T}: 0 = -k11$$

$$k10 = 0$$

$$k11 = 0$$

$$k12 = -1$$

$$\pi_4 = \mathbf{D}_T / \mathbf{D}$$

$$P/\rho N^3 D^5 = f \{ (\rho N D^2 / \mu), (N^2 D/g), (D_T/D) \}$$

Značajka snage:

$$N_P = P/\rho N^3 D^5$$

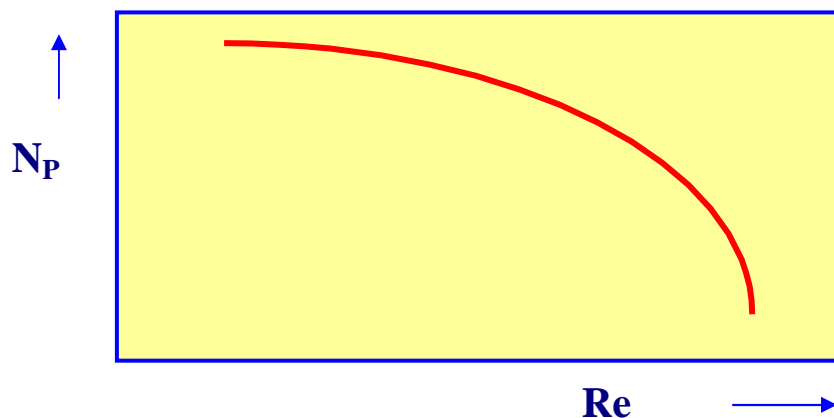
Reynolds-ova značajka:

$$Re = \rho N D^2 / \mu$$

Froud-ova značajka:

$$Fr = N^2 D/g$$

$$N_p = f (Re, Fr, D_T/D)$$



NA SLIČAN NAČIN, KOD FILTRACIJE DOBIVAMO:

$$H = F \left(\frac{\rho d v}{\mu} \right)^A \left(\frac{d g}{v^2} \right)^B \left(\frac{h}{d} \right)^C \left(\frac{D}{d} \right)^E \left(\frac{e}{d} \right)^F (P)^G (U)^H (Z)^I$$

Gdje je:

H - gubitak tlaka

F - funkcija

D - Promjer spremnika

g - konstanta grav.

μ - viskoznost

v - brzina toka

ρ - gustoća

d - promjer čestice

e - značajka površine

h - visina filt. ispune

U - raspodjela čestica

P - poroznost f. medija

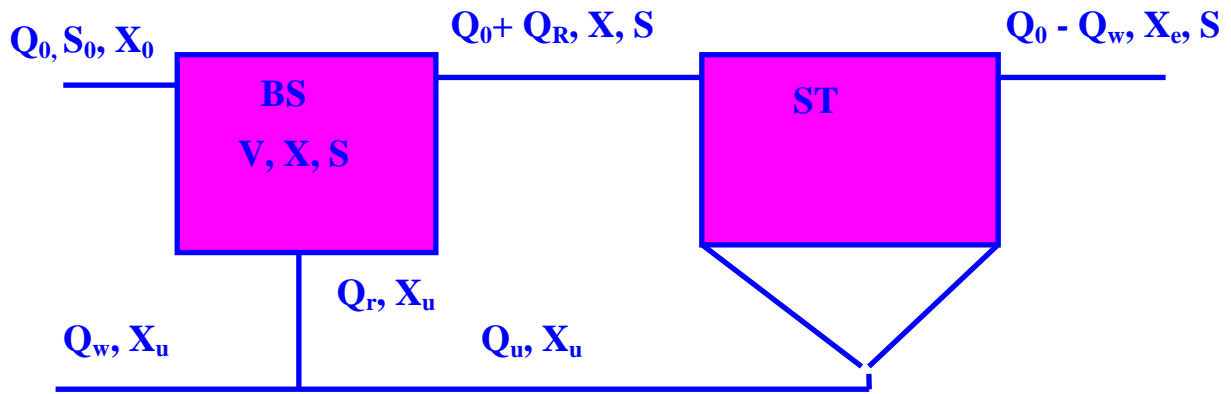
Z - značajka oblika č.

Gubitak tlaka ovisit će od:

- 1. visine filtarske ispune**
- 2. veličina čestica ispune**
- 3. oblika čestica**
- 4. poroznosti ispune**
- 5. složenosti ispune**
- 6. veličine: D/d**

$$\mathbf{D/d > 50}$$

$$\mathbf{d = 0.5 \text{ mm} \quad D = 25 \text{ mm}}$$



Koncentracija biomase X

Vrijeme zadržavanja - hidrauličko

$$\theta = V/Q_0$$

Vrijeme zadržavanja - biomase (starost mulja)

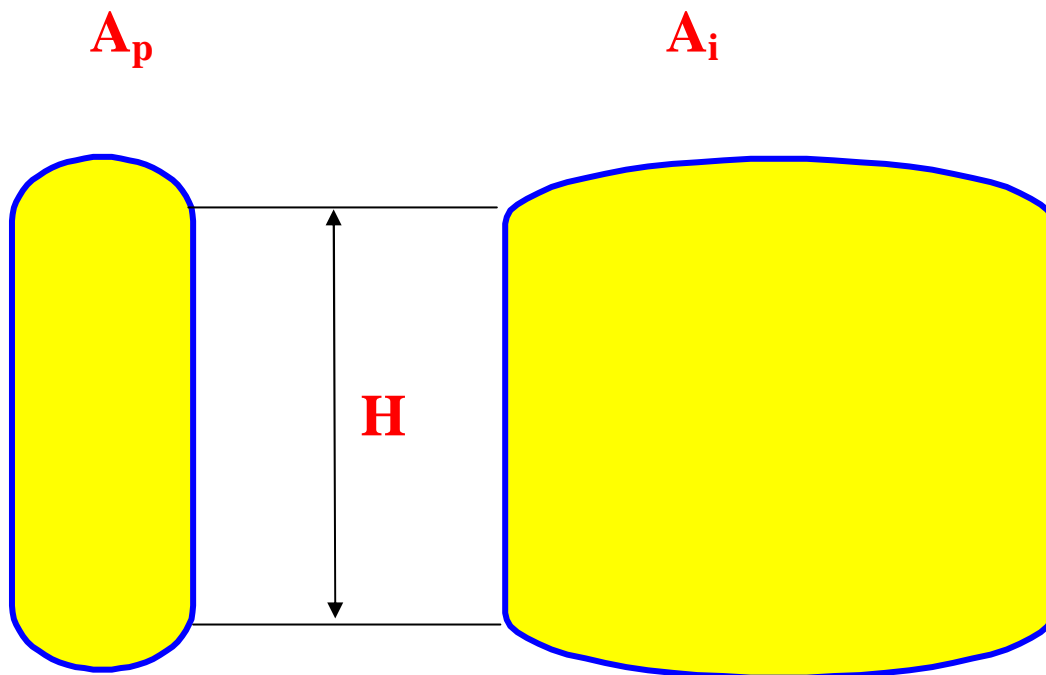
$$\theta_c = (VX)/(Q_w X_u)$$

Prostorno opterećenje

$$V_L = Q * S_0/V \quad \text{kg BPK}_5/(\text{m}^3 * \text{d})$$

Muljno opterećenje

$$F/M = Q (S_0 - S)/(V * X) \quad \text{kg BPK}_5/(\text{kg ST} * \text{d})$$



**Pilot
postrojenje**

**Industrijsko
postrojenje**

$$H_p = H_i$$

$$A_p * r = A_i$$

$$V_p * r = V_i$$

$$Q_p * r = Q_i$$

$$\Theta = V_p/Q_p = V_i/Q_i$$

PILOT-POSTROJENJA
FAKULTETA KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I
TEHNOLOGIJE ZAGREB

1. Babina Greda	pitke vode
2. Bjelova	otpadne vode
3. Bjelovar	pitke vode
4. Buzet	pitke vode
5. Čazma	pitke vode
6. Ivanić Grad	pitke vode
7. Koprivnica	otpadne vode
8. Osijek	pitke vode
9. Petrinja	pitke vode
10. Požega	pitke vode
11. Ravnik	pitke vode
12. Sunja	pitke vode
13. Veliki Zdenci	otpadne vode
14. Vinkovci	pitke vode
15. Zagreb	otpadne vode

OSTALE DJELATNOSTI

1. Davor	pitke vode
2. Drenovci	pitke vode
3. Kutina	otpadne vode
4. N.P. Krka	pitke vode
5. Nova Rača	pitke vode
6. Rijeka	otpadne vode
7. Varaždin	otpadne vode

KARAKTERISTIKE I SASTAV OTPADNIH VODA

GRADOVI:

Pokazatelj:

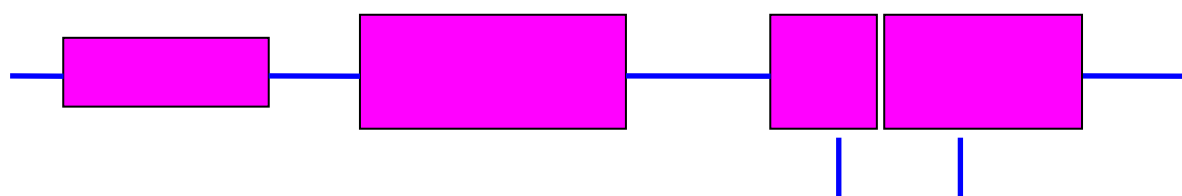
	Jedinica	Vrijednost	MDK
Protok, Q,	m ³ /h		
Susp. tvar	mg/L	220	
Taloživa tvar,	mL/L	10	
BPK ₅ , O ₂	mg/L	220	25
KPK, O ₂	mg/L	500	125
Ukupni N	mg/L	40	10
Org-N	mg/L	15	
NH ₃ -N	mg/L	25	
NO ₂ -N	mg/L	0	
NO ₃ -N	mg/L	0	
Ukupni P	mg/L	8	2
Org-P	mg/L	3	
Anorg-P	mg/L	5	
Kloridi, Cl ⁻	mg/L	50	
Alk., CaCO ₃	mg/L	100	
Masnoće	mg/L	100	

INDUSTRIJA

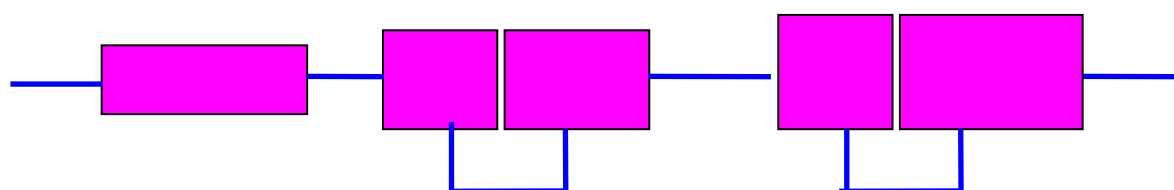
KPK, O₂	mg/L	500-10000	
---------------------------	-------------	------------------	--

PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA GRADA BJELOVARA

Prije rekonstrukcije



Nakon rekonstrukcije



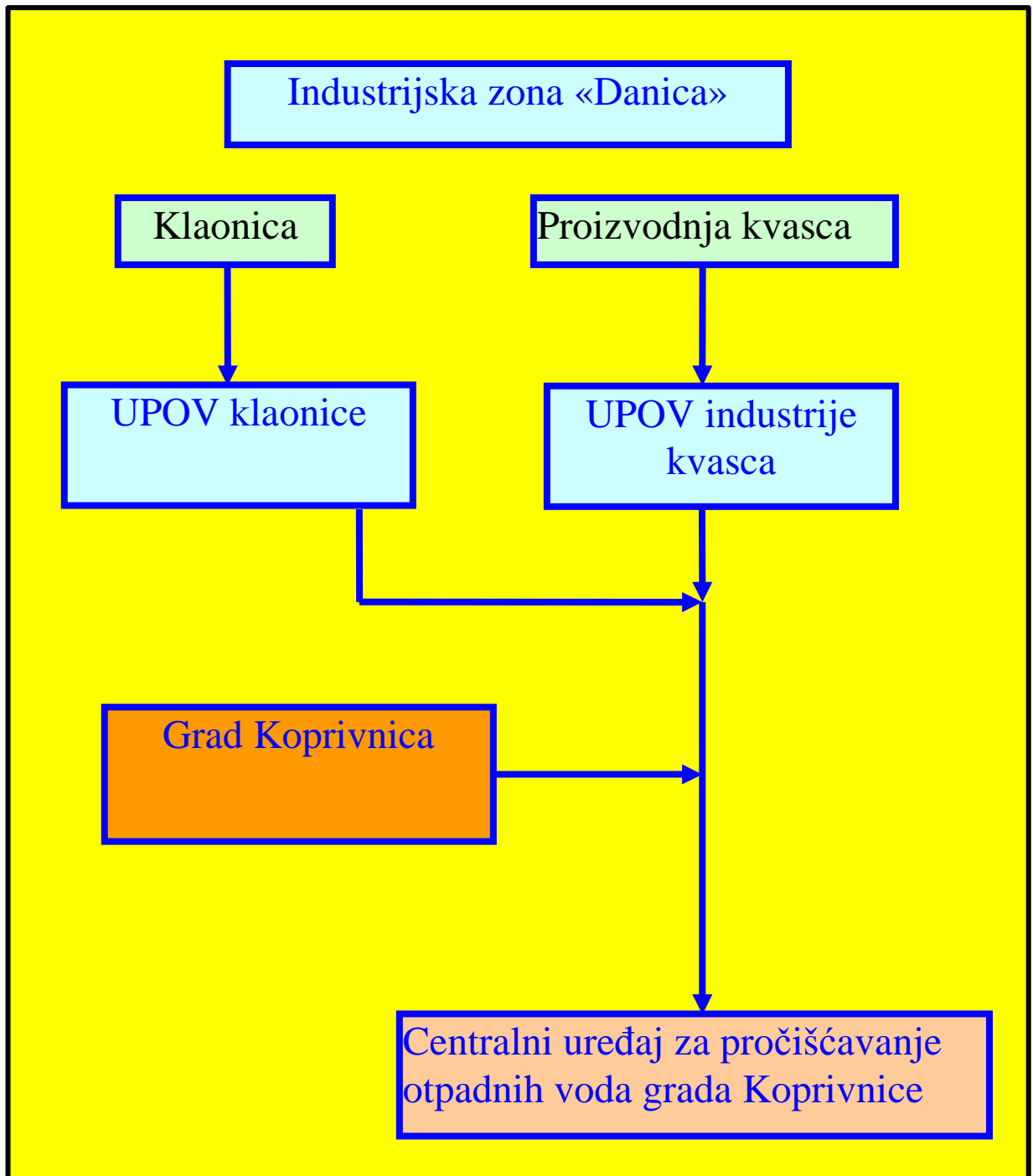
Pokusi pomoću pilot-postrojenja. AB postupak

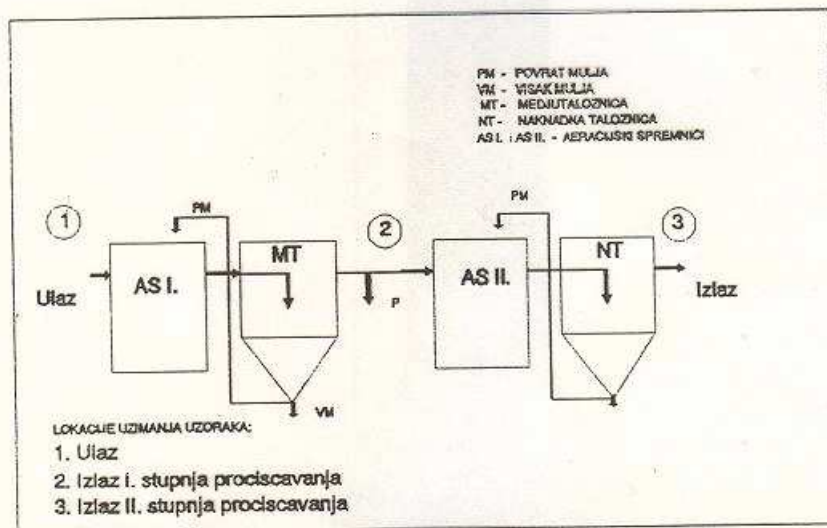
Pokazatelj	U	A	B	Učinak %		
KPK, mg/L	1200	580	180	85.0		
BPK ₅ , mg/L	520	205	51	90.2		
ST, mg/L	388	160	70	82.0		
NH ₃ -N, mg/L	12.8	9.0	5.7	55.5		
UN, mg/L	39.5	32.4	12.5	68.4		
UP, mg/L	4.8	2.7	1.6	66.7		

Nakon rekonstrukcije

Pokazatelj	U	A	B	Učinak %		
KPK, mg/L	1072	680	227	78.8		

PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA INDUSTRIJE I GRADA KOPRIVNICE 1991/1992





SLIKA 2.1.1. Shematski prikaz laboratorijskog pilot-uredjaja.

Otpadne vode grada Koprivnice

Rezultati pokusa "AB" postupkom:

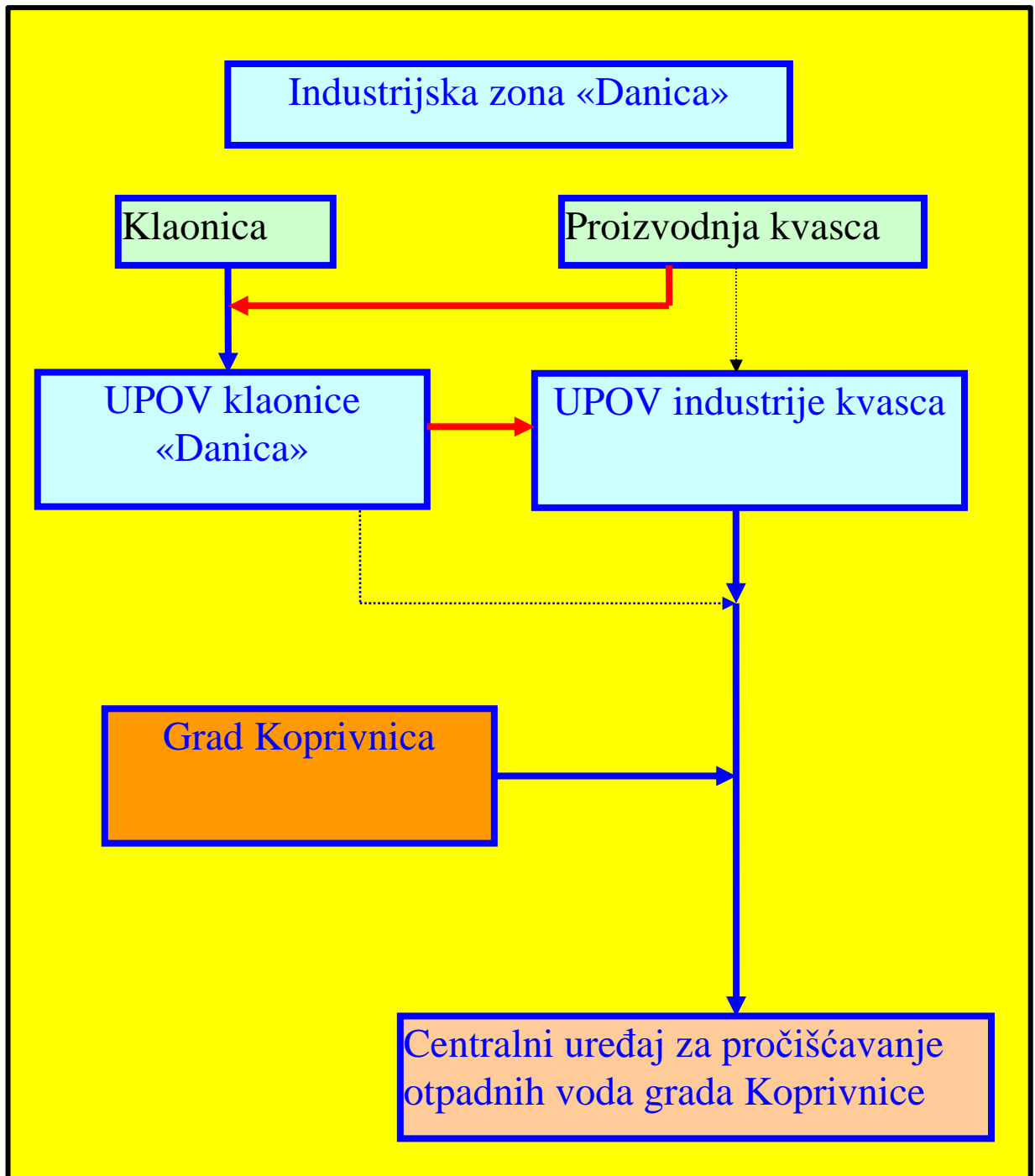
	Vrijednosti KPK, O ₂ mg/L	
	50 %	T(95/15)
Ulaz:	441	590
Izlaz A:	249	431
Izlaz B:	142	212

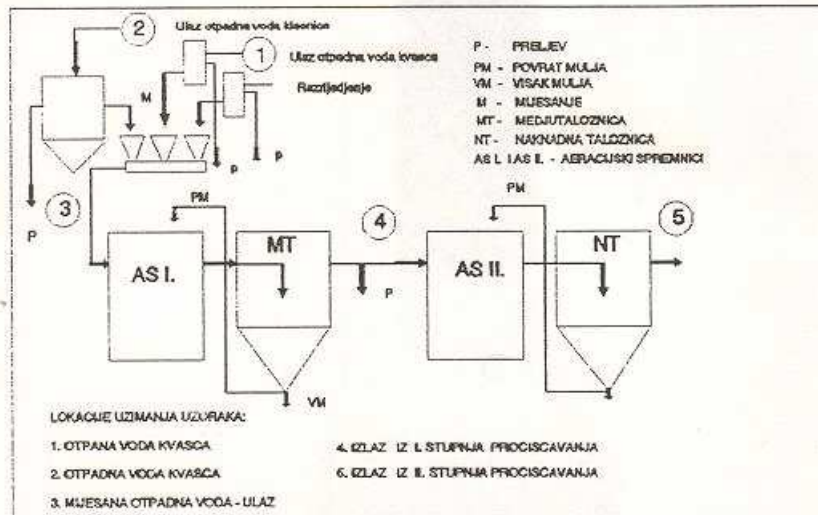
Otpadne vode industrijske zone "Danica"

	KPK mg/L	Q m ³ /d
<u>Klaonica i tvornica konzervi</u>		
ulaz	3.630	1.500
izlaz	530	
<u>Tvornica kvasca</u>		
ulaz	3.200	1.100
izlaz	1.810	

Ukupno ulaz	3.450	2.600
izlaz	1070	

Zajedničko pročišćavanje otpadne vode klaonice i proizvodnje kvasca AB postupkom

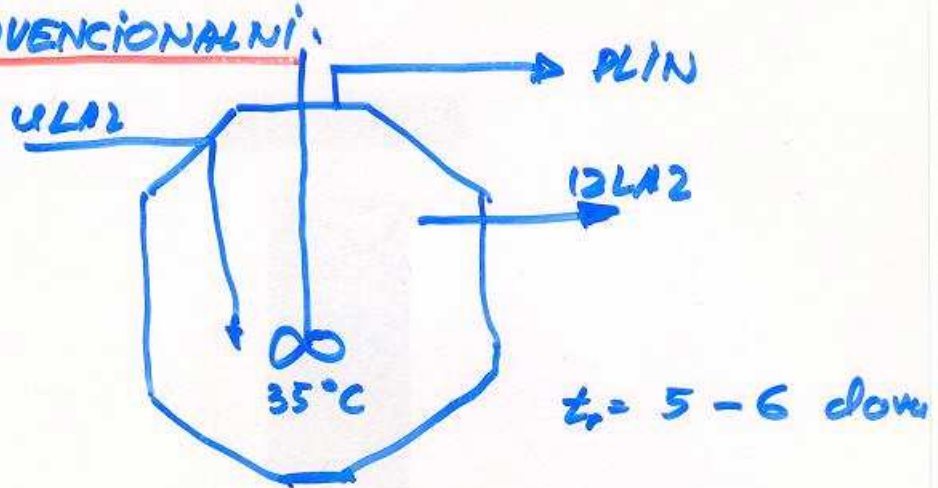




SLIKA 2.2.1. Shematski prikaz pilot-uredjaja za dvostupanjsko biološko pročišćavanje otpadnih voda.

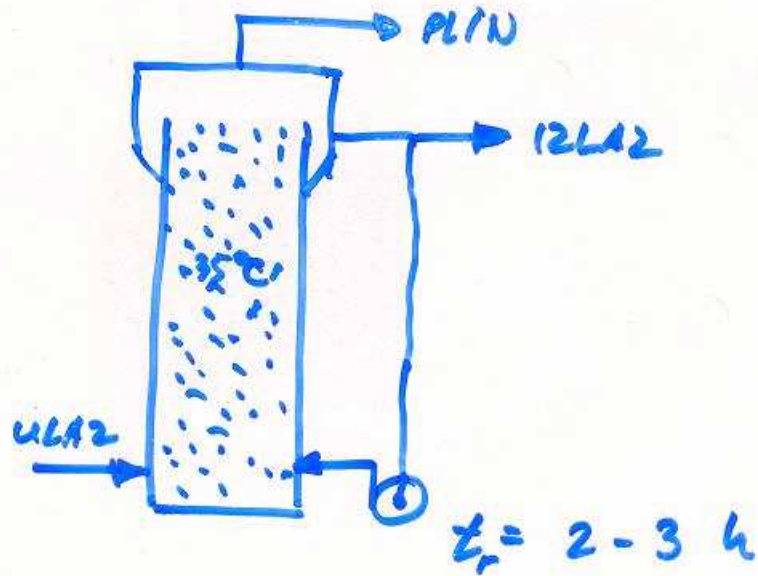
ANAEROBNI REAKTORI

KONVENCIONALNI

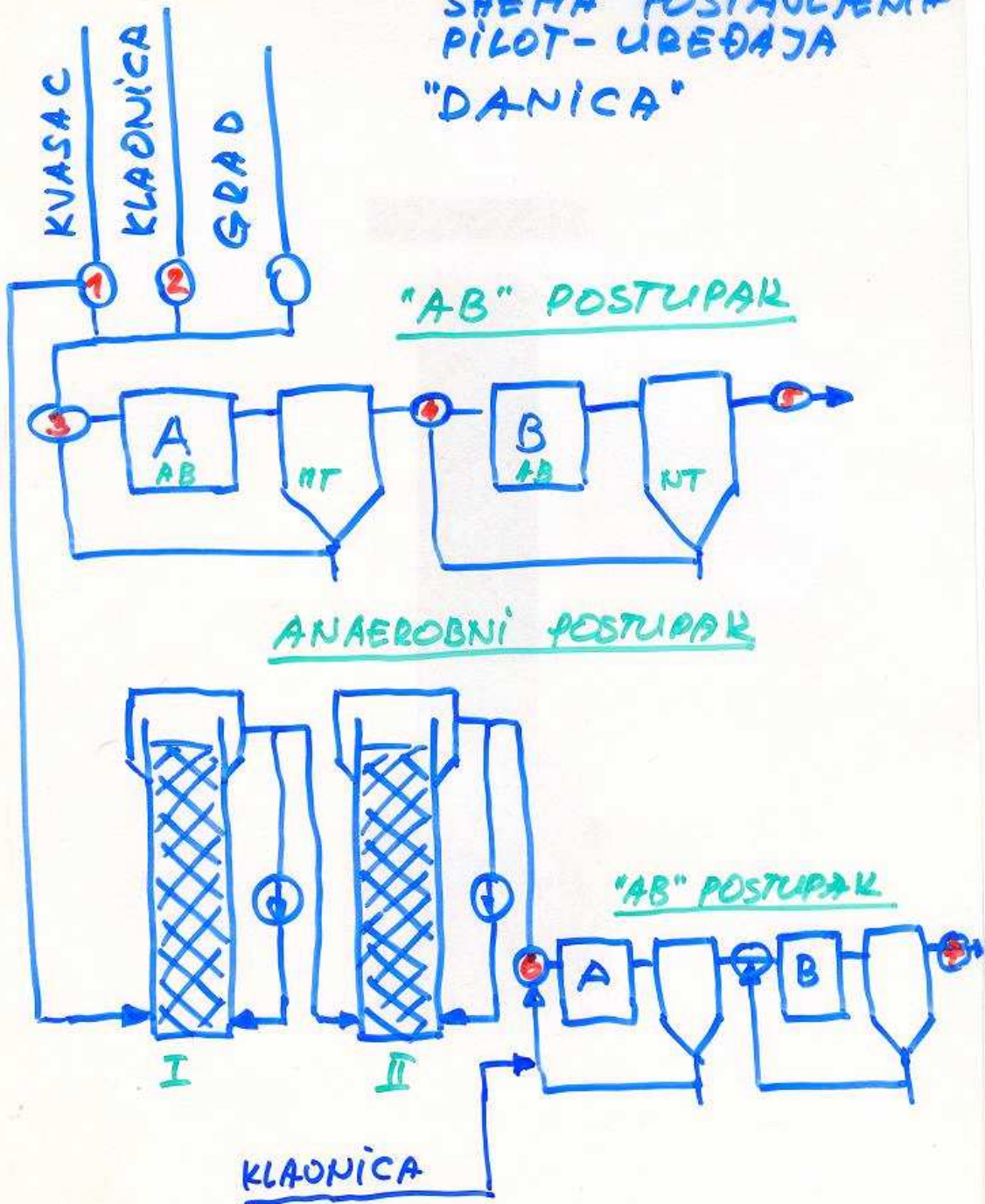


REAKTOR S LEBDECIM MLETJEM

~ 1985.



SHEMA POSTAVLJENIH
PILOT-UREĐAJA
"DANICA"



Vrijednosti KPK (mg/L O₂) na ulazu i izlazu iz anaerobnog reaktora za obradu otpadnih voda iz proizvodnje kvasca

Mjesec	Broj uz.	Ulaz	Izlaz	Učinak %
Rujan 91	12	3175	2948	7.2
Listopad 91				
Studeni 91	13	2492	2020	18.9
Prosinac 91	13	3316	1963	40.8
Siječanj 92	23	2637	844	68.0
Veljača 92	26	2877	1185	58.8
Ožujak 92	31	3085	1058	65.7
Travanj 92	24	4570	1543	66.2

Obradba otpadnih voda iz proizvodnje kvasca anaerobnim i aerobnim postupkom

Mjesec	Ulaz	Izlaz	Izlaz A	Izlaz B
Prosinac 91	3310	1900		580
Siječanj 92	2637	844	662	443
Veljača 92	2877	1185	917	702
Ožujak 92	3085	1058	490	478
Travanj 92	4570	1543	515	430

OBRADA I DISPOZICIJA MULJA

TYPIČNI TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPAKA ANAEROBNE STABILIZACIJE MULJA

Parameter	Spori reaktor	Brzi reaktor
Vrijeme zadržavanja, d	30-90	10 –20
Opter. ST, g/(m³*d)	0,5-1.6	1.6 – 6.4
ST u efluentu, %	4-6	4-6
Smanjenje ST, %	35-50	45-55
Proizv. plina, m³/kg ST	0.5 –0.55	0.5-0.65
Sadržaj metana, %	65	65

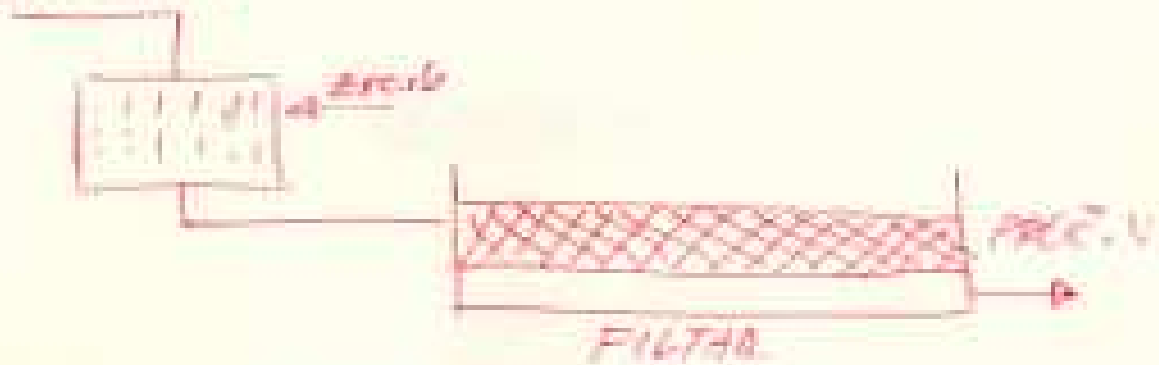
OBRADA I DISPOZICIJA MULJA

TYPIČNI TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPAKA AEROBNE STABILIZACIJE MULJA

Vrsta mulja	Parameter	Vrijednost
PM	Vrijeme retencije	15-20 d
	Potrošnja zraka	20-35 L/(min*m³)
	Snaga	0,02-0,03 kW/m³
	Opterećenje ST	1,6-3.2 kg/(m³*d) ST
PM + SM	Vrijeme retencije	20-25 d
	Potrošnja zraka	55-65 L/(min*m³)
	Snaga	0,02-0,03 kW/m³
	Opterećenje ST	1,6-3.2 kg/(m³*d) ST

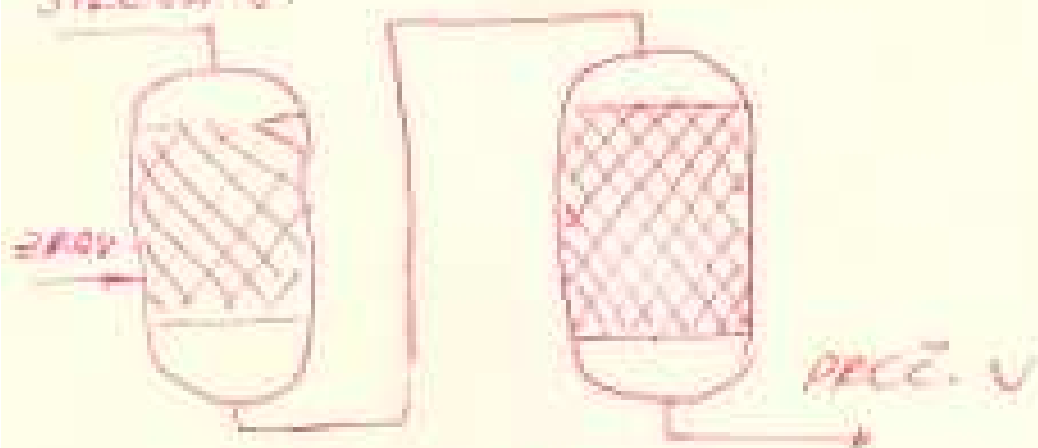
AERACIJA VODE

SIBOVNA V.



OTVORENI SUSTAV
PRERADBE VODE

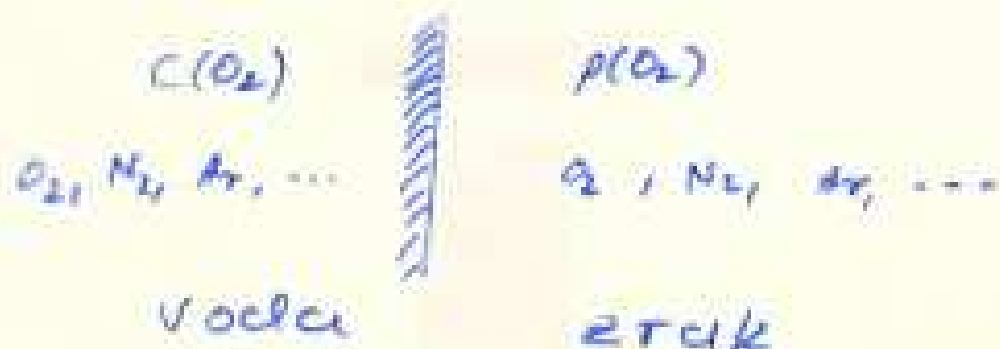
SIBOVNA V.



ZATVORENI SUSTAV
PRERADBE VODE

TOPLJIVOST PLINOVA

Henry-ev zakon



$$C(O_2)_l = k_H \cdot p(O_2)$$

k_H - Henry-eva konstanta

$$k_H / g \cdot m^3 \cdot Pa^{-1}$$

$$C(O_2)_l = k_D \cdot C(O_2)_g$$

k_D - koeficijent raspodjele

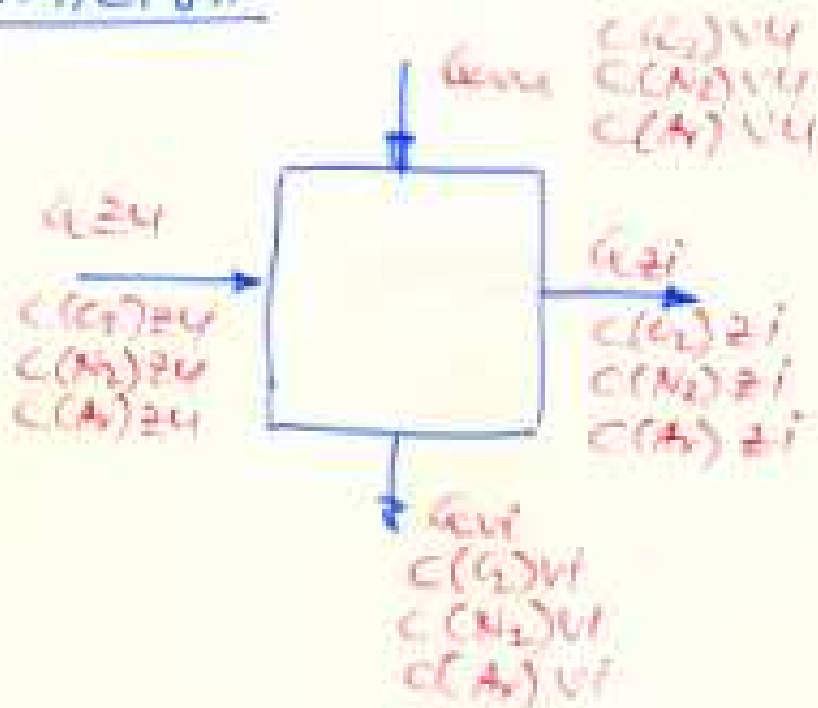
$$k_D / 1$$

$$k_D = k_H \cdot M / R \cdot T$$

$$(k_D)_2 = (k_D)_1 \cdot e^{k_{const}(T_2 - T_1)}$$

AERACIJA

©



$$\begin{aligned} C(O_2)V_1 &= COV_1 \\ C(N_2)V_1 &= CNV_1 \\ C(A)V_1 &= CAV_1 \end{aligned}$$

itd

$$\begin{aligned} CO_{24} &= 9.344 \text{ mol m}^{-3} \\ CN_{24} &= 34.824 \text{ mol m}^{-3} \\ CA_{24} &= 0.415 \text{ mol dm}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X(O_2) &= 0.2035 \\ X(N_2) &= 0.7808 \\ X(A) &= 0.0033 \\ K_0(O_2) &= 0.0333 \\ K_0(N_2) &= 0.0166 \\ K_0(A) &= 0.0372 \end{aligned}$$

$$COVi = K_D(O_i) \cdot COZi$$

$$CNVi = K_D(N_i) \cdot CNZi$$

$$CAVi = K_D(A) \cdot CAZi$$

$$Q_{2U} \cdot CO_{2U} = Q_{Vi} \cdot COVi + Q_{Zi} \cdot \underline{COZi}$$

$$Q_{2U} \cdot CN_{2U} = Q_{Vi} \cdot CNVi + Q_{Zi} \cdot \underline{CNZi}$$

$$Q_{2U} \cdot CA_{2U} = Q_{Vi} \cdot CAVi + Q_{Zi} \cdot \underline{CAZi}$$

$$COZi + CNZi + CAZi = 44,6$$

$$Q_{VU} = Q_{Vi}$$

$$CO_{VU} = 0$$

$$CN_{VU} = 0$$

$$CA_{VU} = 0$$

$$COZi =$$

$$CNZi =$$

$$CAZi =$$

$$Q_{Zi} =$$

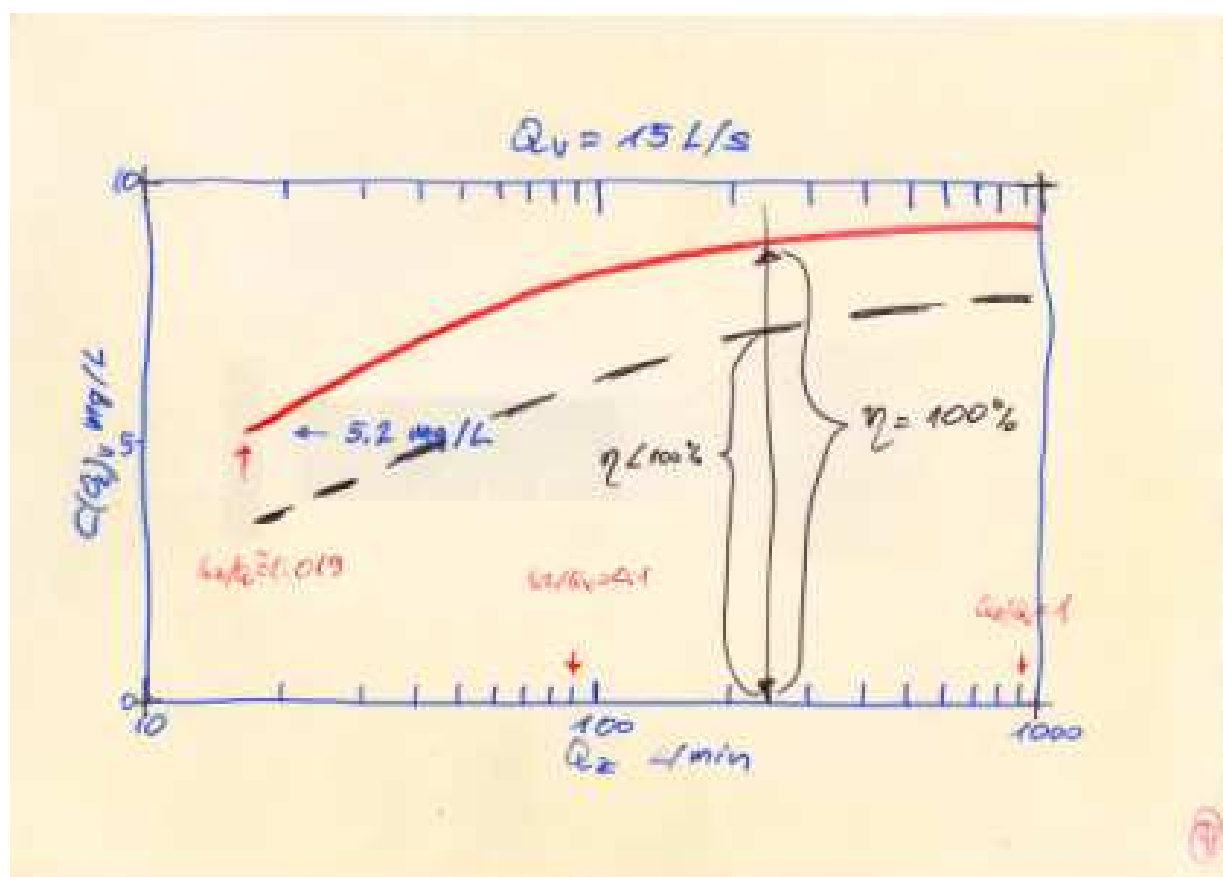
$$Q_{VU} =$$

$$Q_{2U} =$$

$$CO_{2U} =$$

$$CN_{2U} =$$

$$CA_{2U} =$$



KOEFICIJENT AERACIJE

7

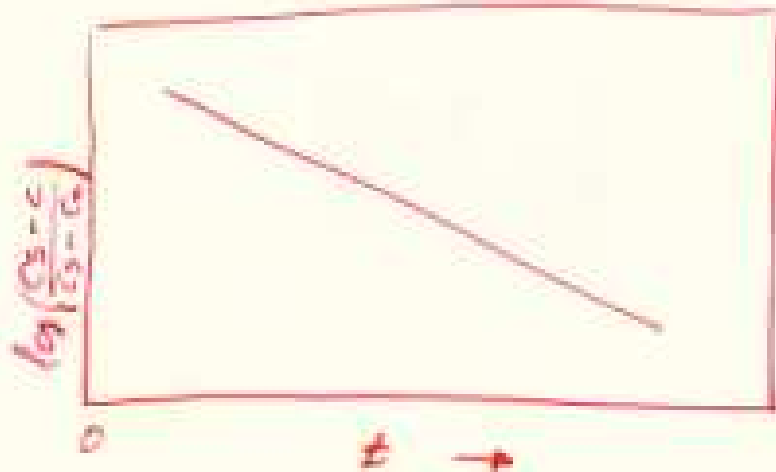
$$\frac{dc}{dt} = k_2 (C_3 - c)$$

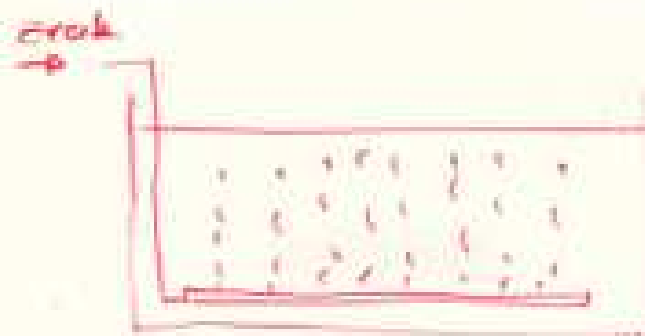
$$\int_{c_0}^c \frac{dc}{C_3 - c} = k_2 \int_0^t dt$$

$$\frac{C_3 - c}{C_3 - c_0} = e^{-k_2 \cdot t}$$

$$\log\left(\frac{C_3 - c}{C_3 - c_0}\right) = \log e^{-k_2 \cdot t}$$

$$\log\left(\frac{C_3 - c}{C_3 - c_0}\right) = -0.7343 \cdot k_2 \cdot t$$





$t(s)$	$c (g m^{-3})$	$e^{-k_2 \cdot t}$
0	3.8	1
120	5.2	0.791
240	6.3	0.617
360	7.2	0.493
480	7.9	0.388
600	8.4	0.313
720	8.8	0.254
840	9.2	0.194

$$c_s = 10.5 \text{ g/m}^3 \text{ O}_2$$

$$\log \left(\frac{c_s - c}{c_s - c_0} \right) = -0.4343 \cdot k_2 \cdot t$$

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = 0.4343 \cdot k_2 = 3.279 \cdot 10^{-4}$$

$$k_2 = \frac{3.279 \cdot 10^{-4}}{0.4343} = 2.14 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

KOEFICIJENT EFIKASNOSTI AERACIJE

$$(C_c - C_0) = K (C_s - C_0)$$

$$K = 1 - e^{-k_2 \cdot t_c}$$

SIROVA VODA

C_0

IZLAZ
ZRAK

ZRAK
ULAZ

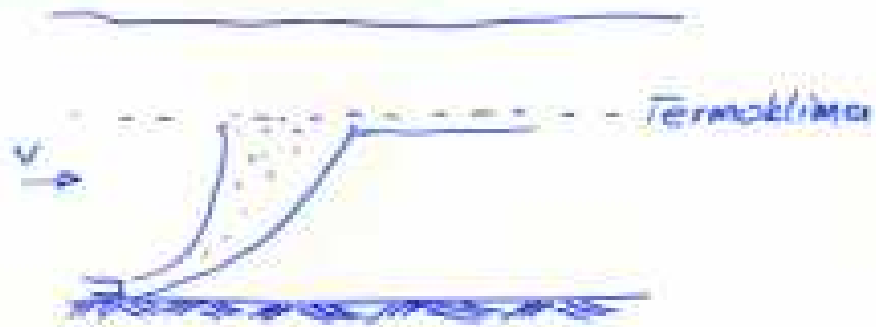
AERIRANA VODA

C_c



PODMORSKI ISPUSTI

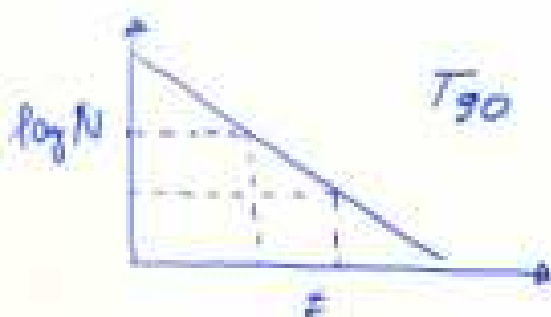
INICIALNO RAZREDENJE



SEKUNDARNO RAZREDENJE



UGIBANJE BAKTERIJA



K R A J