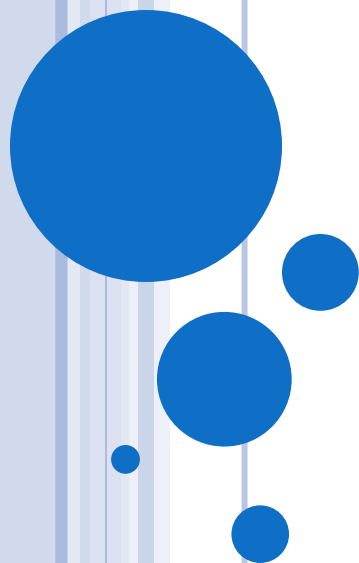
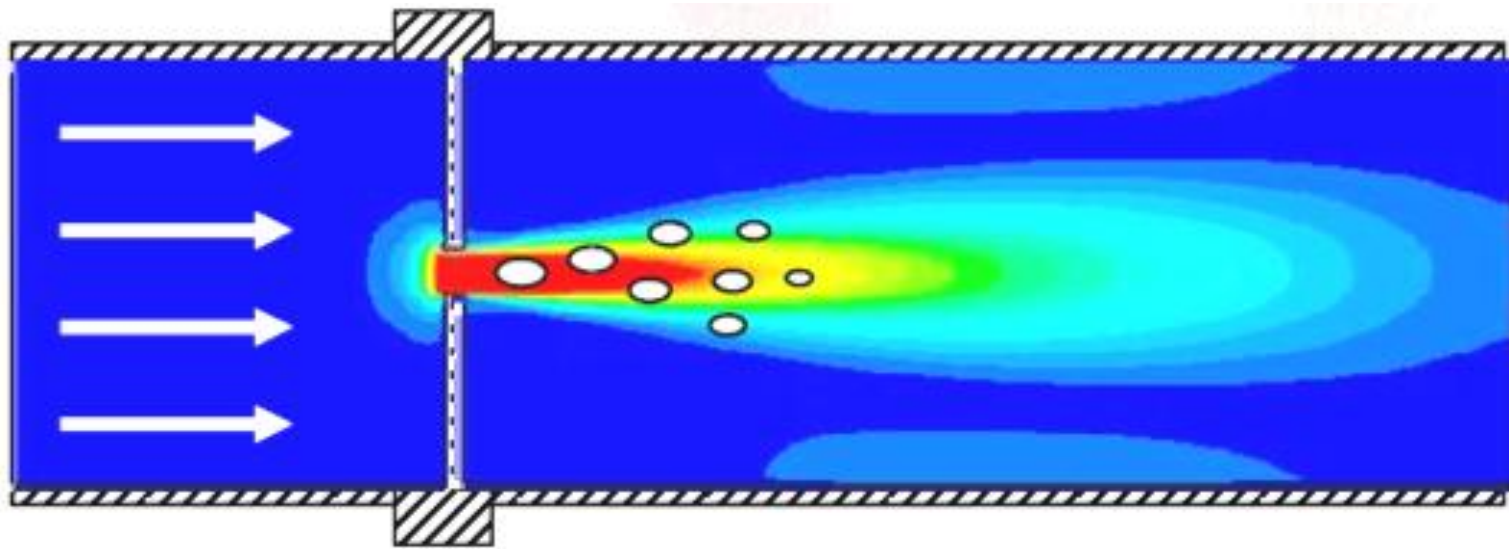


Hidrodinamička kavitacija – efikasan postupak intezifikacije hemijskih reakcija i fizičko-hemijskih procesa



Prof. dr Borivoj Adnađević

Pojava nastajanja, rasta i naglog propadanja (kolapsa) mehura ili šupljine u pokretnom fluidu naziva se kavitacija.



Kavitator sa otvorom



Vrste kavitacije:

- Hidrodinamička kavitacija (HDK)
- Akustična ili zvučna kavitacija
- Optička kavitacija
- Čestična kavitacija

Podela hidrodinamičke kavitacije

- Tranzitna (pomična) HDK
- Stacionarna (mirujuća) HDK
- Vrtložna HDK
- Vibraciona HDK



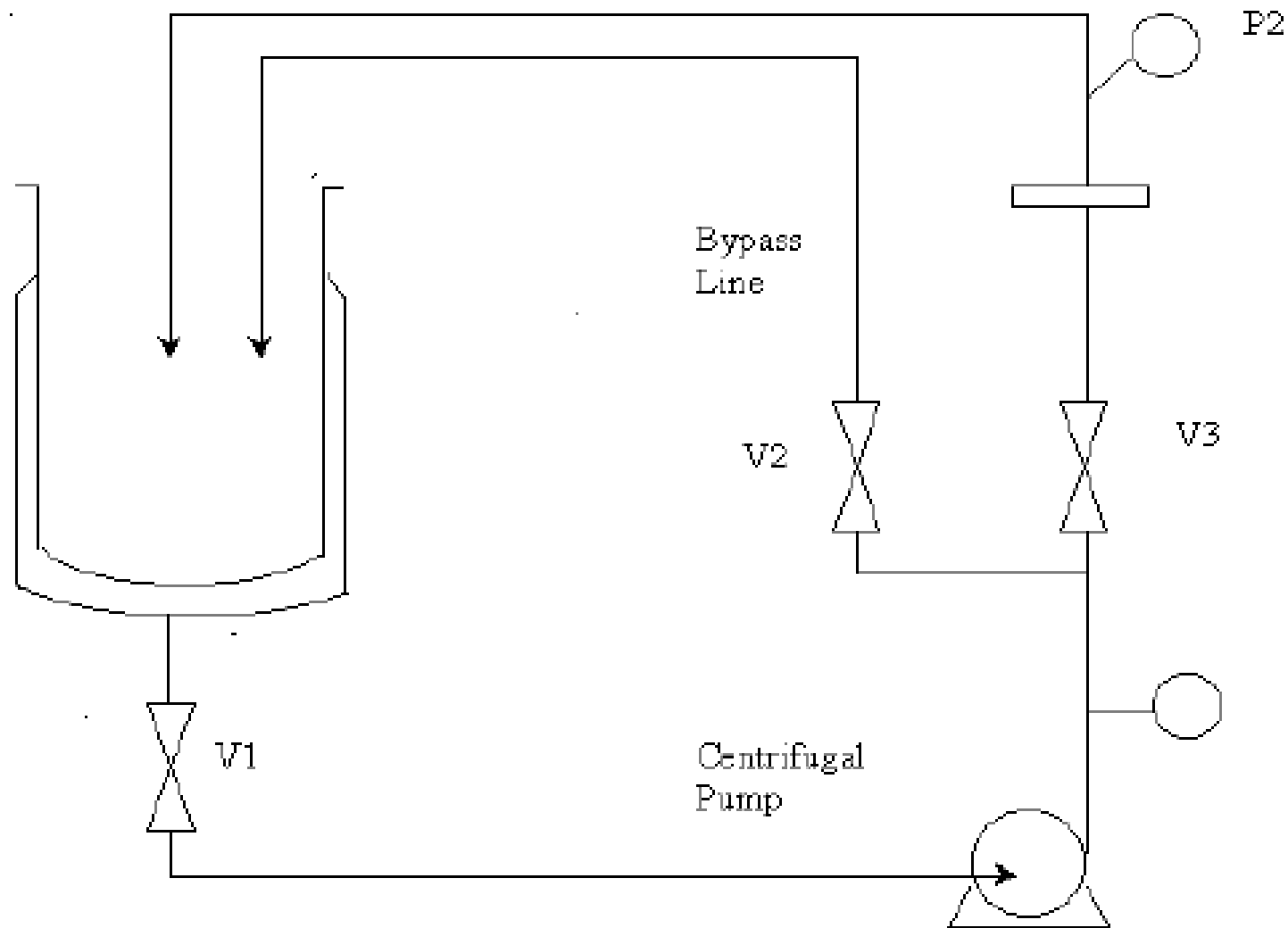
Spoljašnji efekti HDK

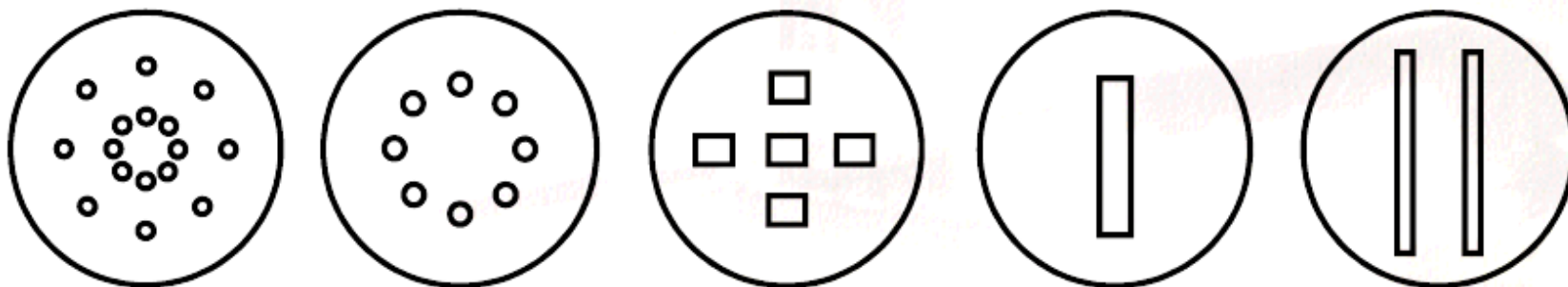
- Visokofrekventni zvuk (buka)
- Formiranje dvofaznog sistema
- Promena toka fluida
- Oštećenja

Efekti HDK na hemijske reakcije i fizičko-hemijske procese

- Povećanje brzine hemijske reakcije i fizičko-hemijskog procesa
 - Povećanje prinosa hemijske reakcije
 - Promena reakcionog puta i mehanizma hemijske reakcije
 - Izmena uslova izvođenja hemijske reakcije ili fizičko-hemijskog procesa
- 

Kavitator sa otvorima

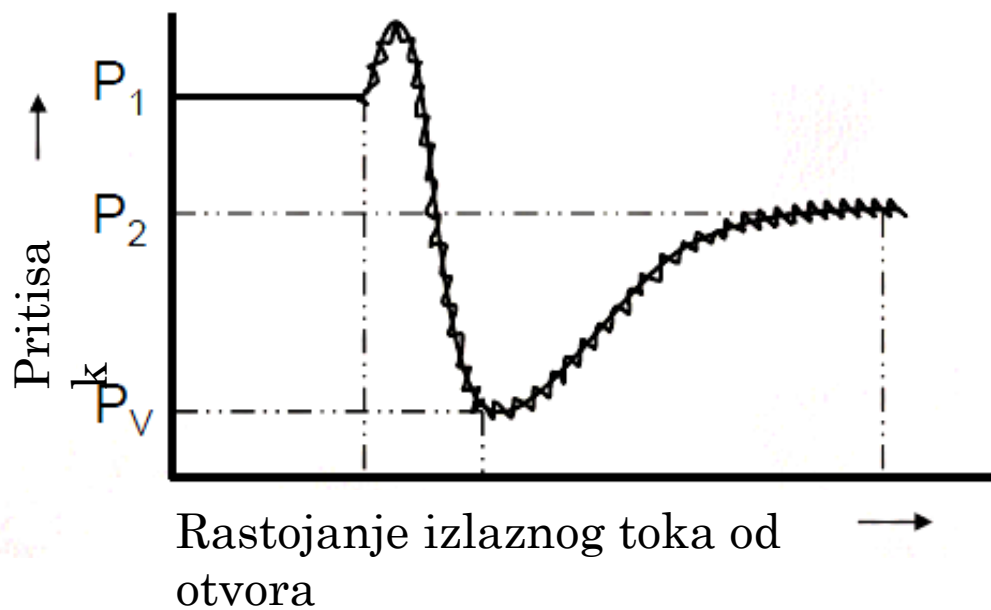
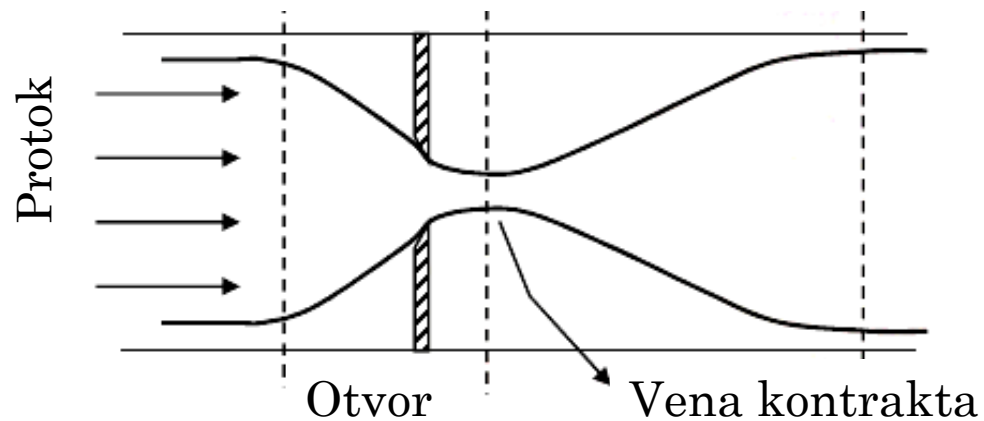




Tipovi ploča sa otvorima



Venturijev tip kavitatora



$$KB = \frac{p_3 - p_v}{0.5\rho \cdot v^2}$$

Kavitacioni indeks (KI)

$$KI = \frac{p_1 - p_3}{0.5\rho \cdot v^2}$$



Rayleigh-Plasset-ova jednačina:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\eta dR}{p_L R dt} + \frac{2 \cdot \gamma}{p_L R} = \frac{p_M(m) - p_\infty(t)}{p_L}$$

$$p_\infty = p_V + \left(\frac{p_3 - p_V}{\tau} \right) \cdot t$$



Razmena energije E_R

$$E = \frac{4.}{3} \cdot \pi \cdot p (R_{\max}^3 - R_c^3) \approx \frac{4}{3} \pi \cdot p R_{\max}^3$$

$$W = \frac{4.}{3} \cdot \pi R_{\max}^3 \cdot \left(\frac{p}{t} \right)$$

$$t = 0.91 \cdot R_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{p}} \quad \bullet$$

$$W_R = \frac{C_p \Delta T}{dc} \propto \frac{\Delta p \cdot Q}{m}$$

$$l = 0.08 \left(\frac{dc + \Phi o}{2} \right)$$

$$v' = (w_R \cdot l)^{1/3}$$

$$v = \frac{v'}{l}$$

$$R_{\max} = \frac{4.7 \cdot \gamma}{\rho \cdot (v')^2}$$

$$R_M = \frac{0.061 \cdot w \cdot \gamma}{2\rho \cdot v^2}$$



Parametartaska analiza

$$p_c = 8 \cdot 10^8 (R_o)^{-1.24} (p_1)^{2.2} \left(\frac{\phi}{d} \right)^{-0.47}$$

$$T_c = 3663 (R_o)^{-0.29} (p_1)^{0.31} \left(\frac{\phi}{d} \right)_{0.35}$$

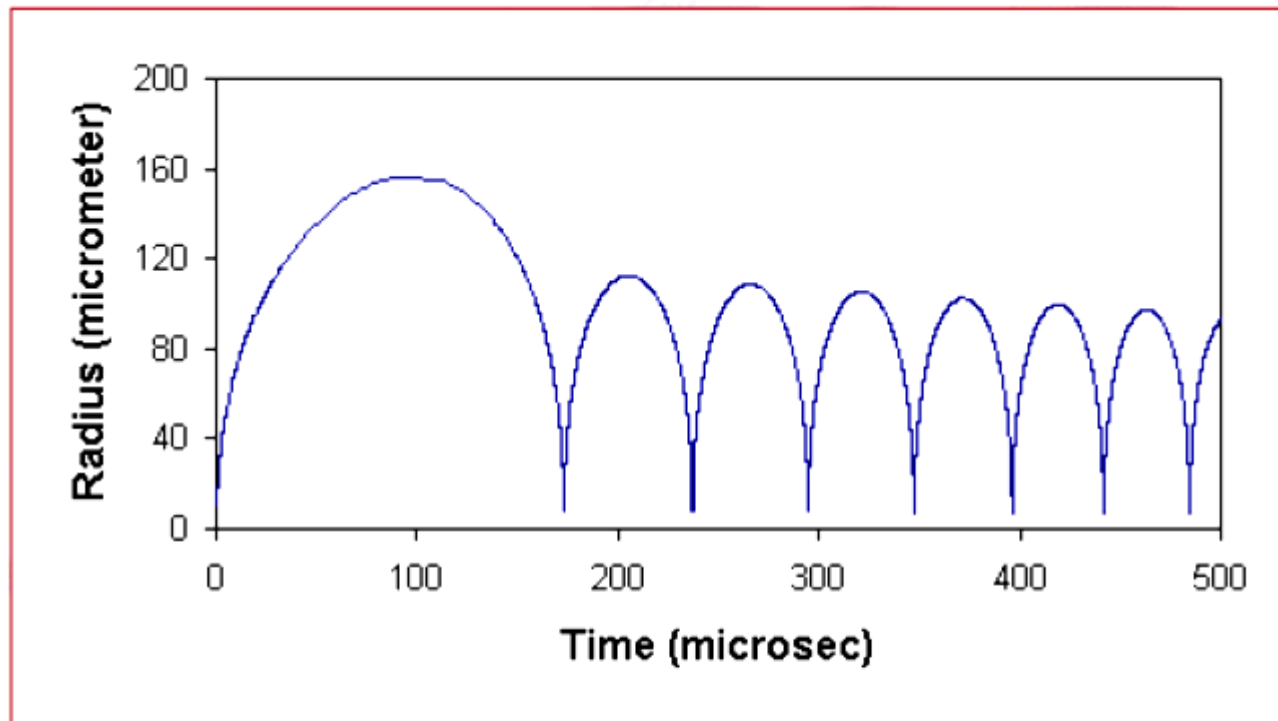


Dinamika mehura

- Prečnik mehura
- Brzina kretanja zida mehura
- Ubrzanje zida mehura
- Pritisak u mehuru

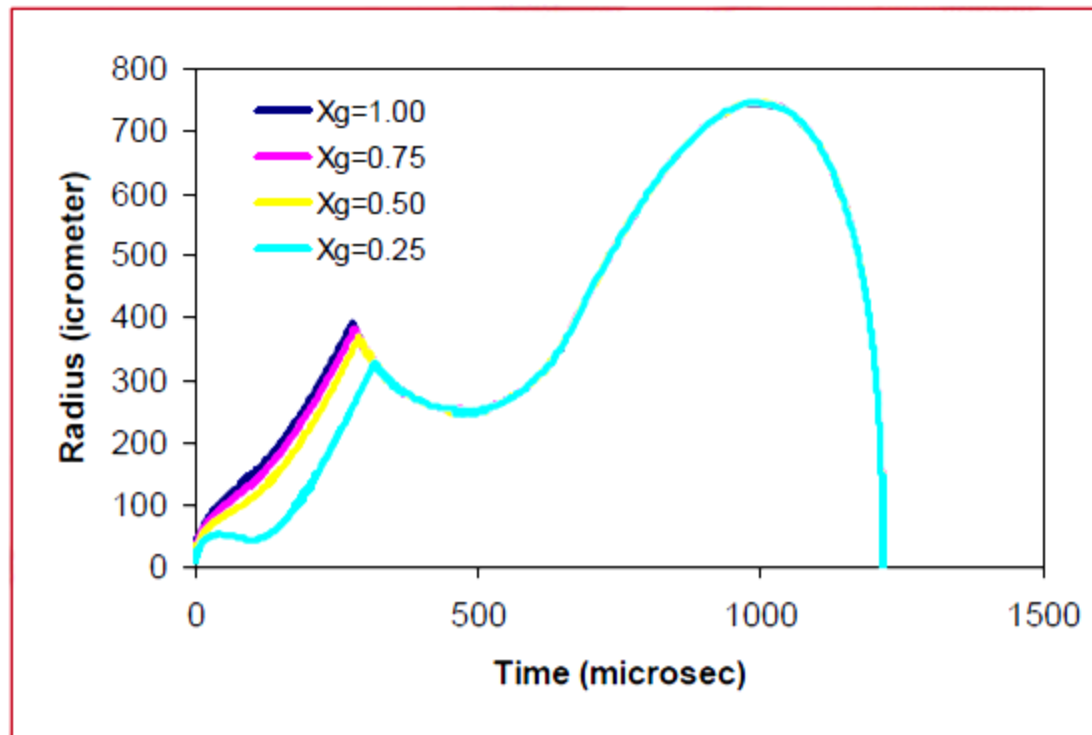


Stacionarna kavitacija



$P_{\text{inlet}} = 11 \text{ atm}$; Gas fraction = 1.0; Orifice dia. = 0.6 mm;
Pipe dia. = 38; Number of orifice = 1;
Orifice velocity = 36 m/s; $Ro = 10 \text{ } \mu\text{m}$;

Pomična kavitacija



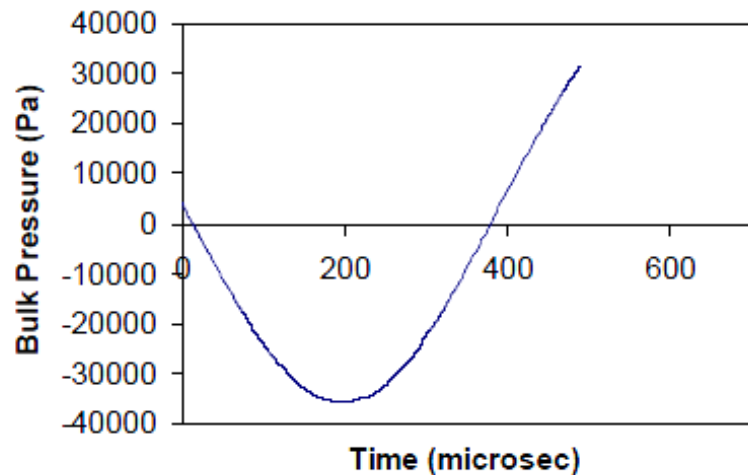
$P_{\text{inlet}} = 3 \text{ atm}$; Orifice dia. = 1 mm;

Pipe dia. = 38; Number of orifice = 33;

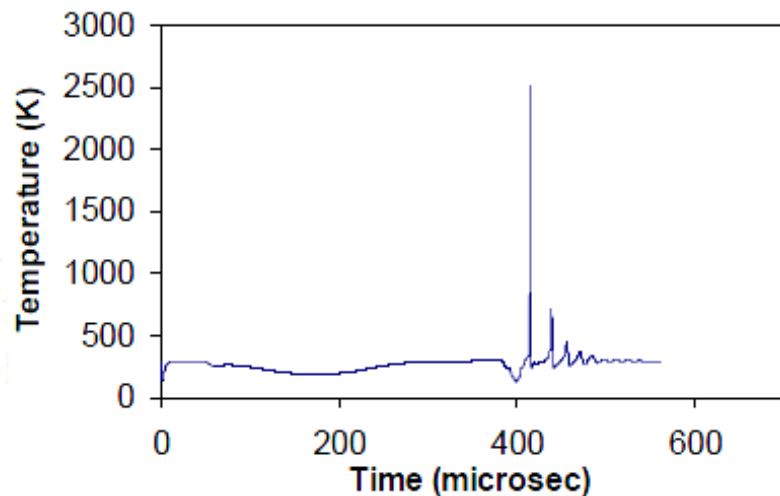
Orifice velocity = 12 m/s; $R_o = 10 \text{ } \mu\text{m}$;



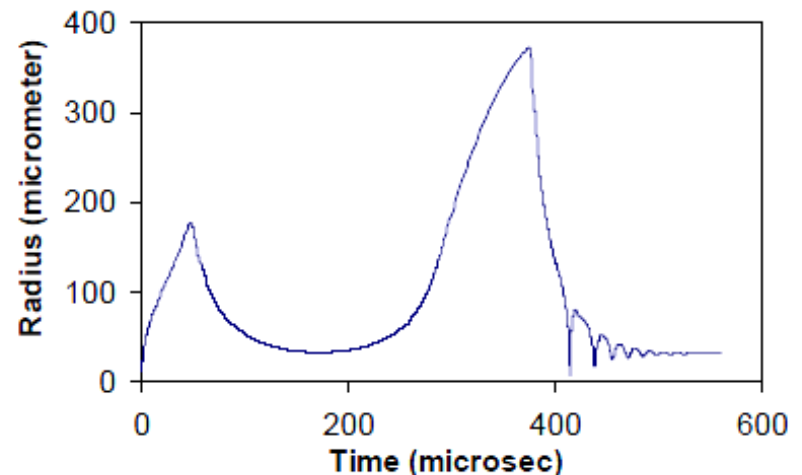
Pomična kavitacija



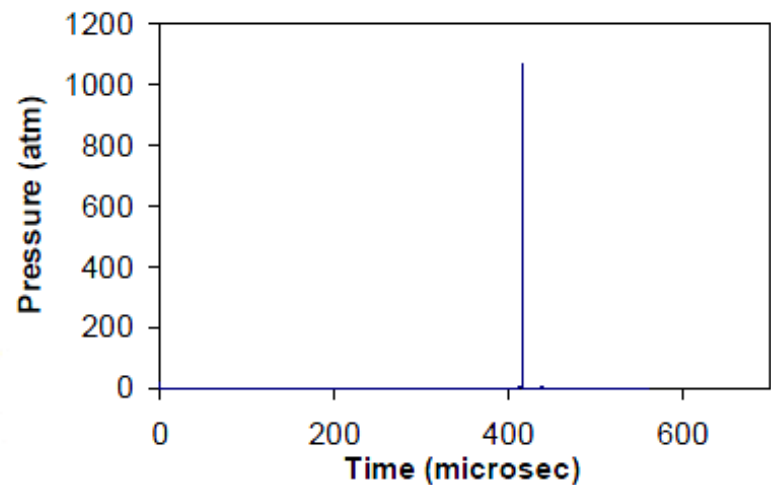
Pressure Recovery Profile



Temperature profile

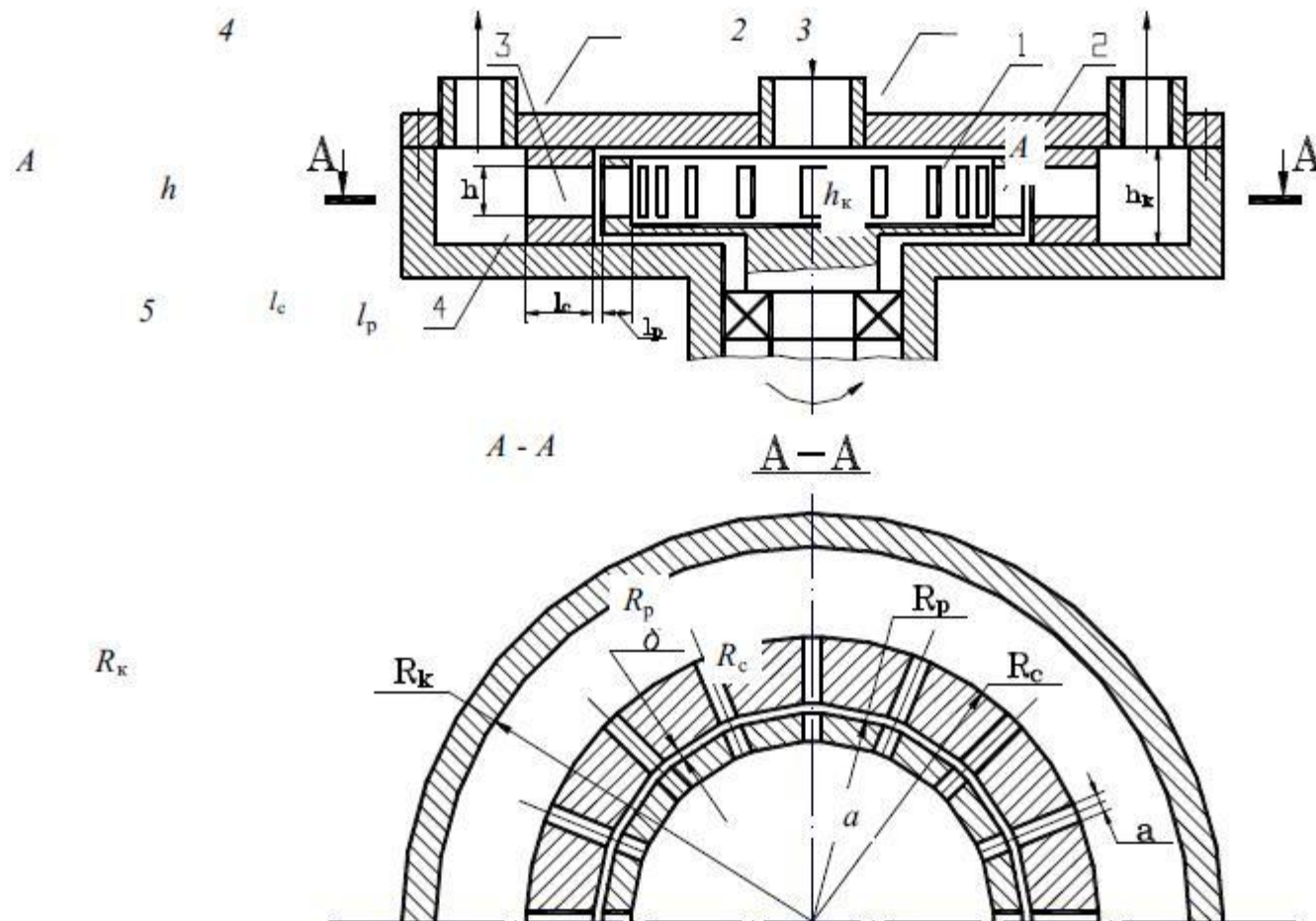


Cavity Dynamics Profile



Collapse Pressure Profile

Pulsno rotacioni kavitator



Pulsno rotacioni kavitator



$$p_2 = p_1 + p_{CF} + p_R - (\Delta p_u + \Delta p_i + 0.5\rho(v_u^2 - v_i^2))$$

$$Q = 2\pi \cdot w \cdot \sqrt{\frac{\frac{(R_i^2 - R_u^2) + 0.4RH}{0.5}}{(2\pi RH)^2 + \frac{0.5K}{A_i^2} + \frac{0.5M}{A_u^2}}}$$

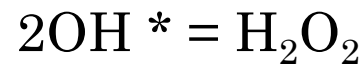
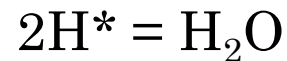
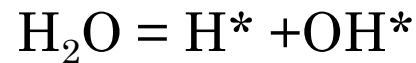
$$p_2 = p_1 + 0.5\rho\left(\frac{Q}{2\pi RH}\right)^2$$

$$W = a \cdot v \left(\frac{w R_r^2}{v} \right)^{b \cdot v} \cdot \left(\frac{\delta}{R_r} \right)^{0.2} \left(\frac{a \cdot z}{R_r} \right)^{0.7} \cdot w^3 \cdot \rho \cdot R_r^4 \cdot h$$

$$d_k = K \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{v^3 a}{2\eta} + \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot p_s}{\rho \cdot R_M} \right)^{-0.4}$$


Kavitacioni efekat

Kolaps (propadanje) mehura (T_p)
dovodi do raspadanja molekula vode
na radikale (Moholkar, 1997)



KJ dozimetar



Kavitacioni prinos CY

$$CY = \frac{\text{masa produkta}}{\text{gustina energije}}$$

Uslovi: 1% KJ, A_{355} , $a_{355} = 26200 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$

Kavitacioni broj	J·mgL ⁻¹	CY
0.1	6x10 ⁻⁶	
0.2	5.7x10 ⁻⁶	1.1x10 ⁻⁹
0.3	2.4x10 ⁻⁶	
0.4	1.3x10 ⁻⁶	
0.5	0	

Gogate (2005)

Rektant	Produkt	CY _a	CY
Toluen	Benzojeva kiselina	3.3x10 ⁻⁶	5.6x10 ⁻⁷
p-ksilen	Tereftalna kiselina	2.1x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁷
o-nitrotoluol	o-nitrobenzojeva kiselina	1.9x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁷
Suncokretovo ulje	MEMK	2.1x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁷



Sinteza nanomaterijala

Prekursor	Proizvod	Kristalna faza	Dijametar kristalita
Zr (NO ₃) ₂	ZrO	kubična	2-10 nm
Ni (NO ₃) ₂	NiO		1-3 nm
Cr (NO ₃) ₃	Cr ₂ O ₃		1-5 nm
Fe (NO ₃) ₃	Fe ₂ O ₃		1-3 nm
TIP/ i-propanol	TiO ₂	anatas	1-6 nm

KSO, PRC

1MNH₄OH

Zeolit A, Y, ZSM-5, SAPO, Taložni SiO₂, Al₂O₃,

Hidrosiapatit, BaTiO₃



Sinteza nanokalcita

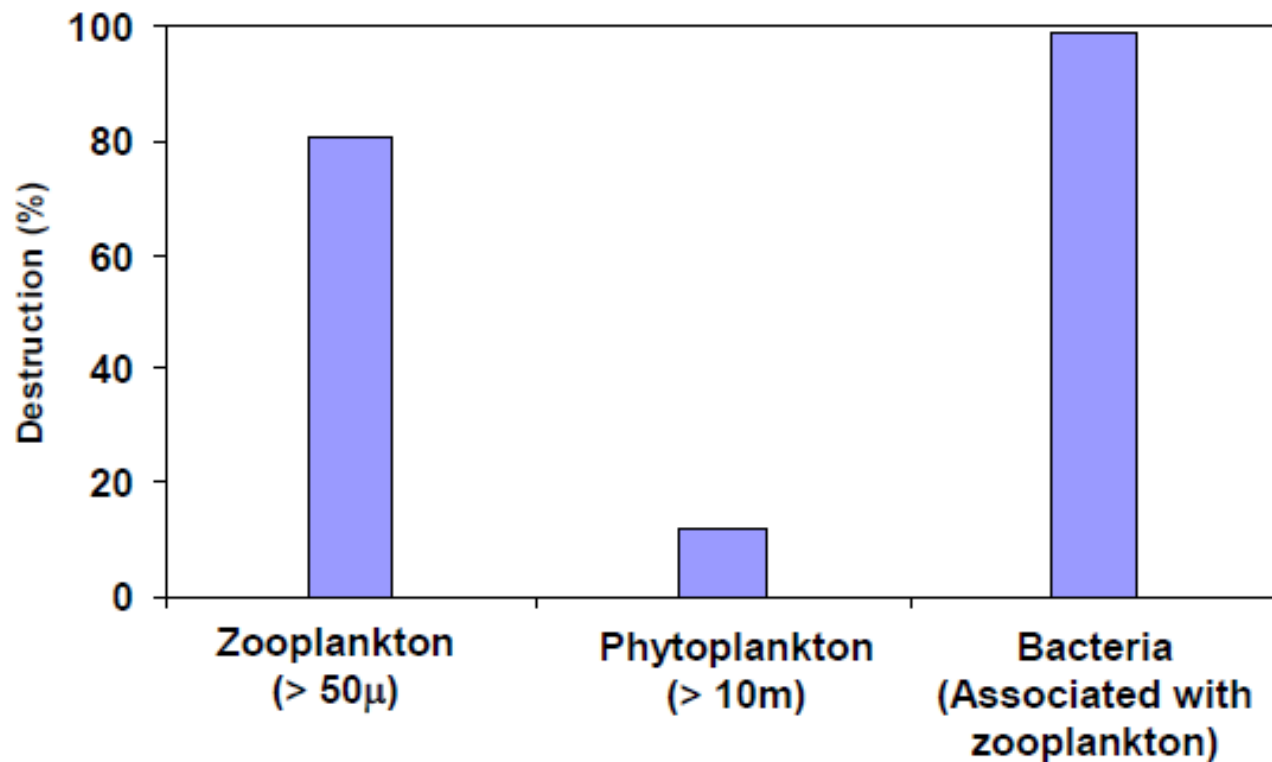
Uticaj prečnika otvora na dijametar kristalita

Prečnik otvora (mm)	Dijametar kristalita (nm)
2	39
3	49
4	74
12	200

VEK (1-5) nm



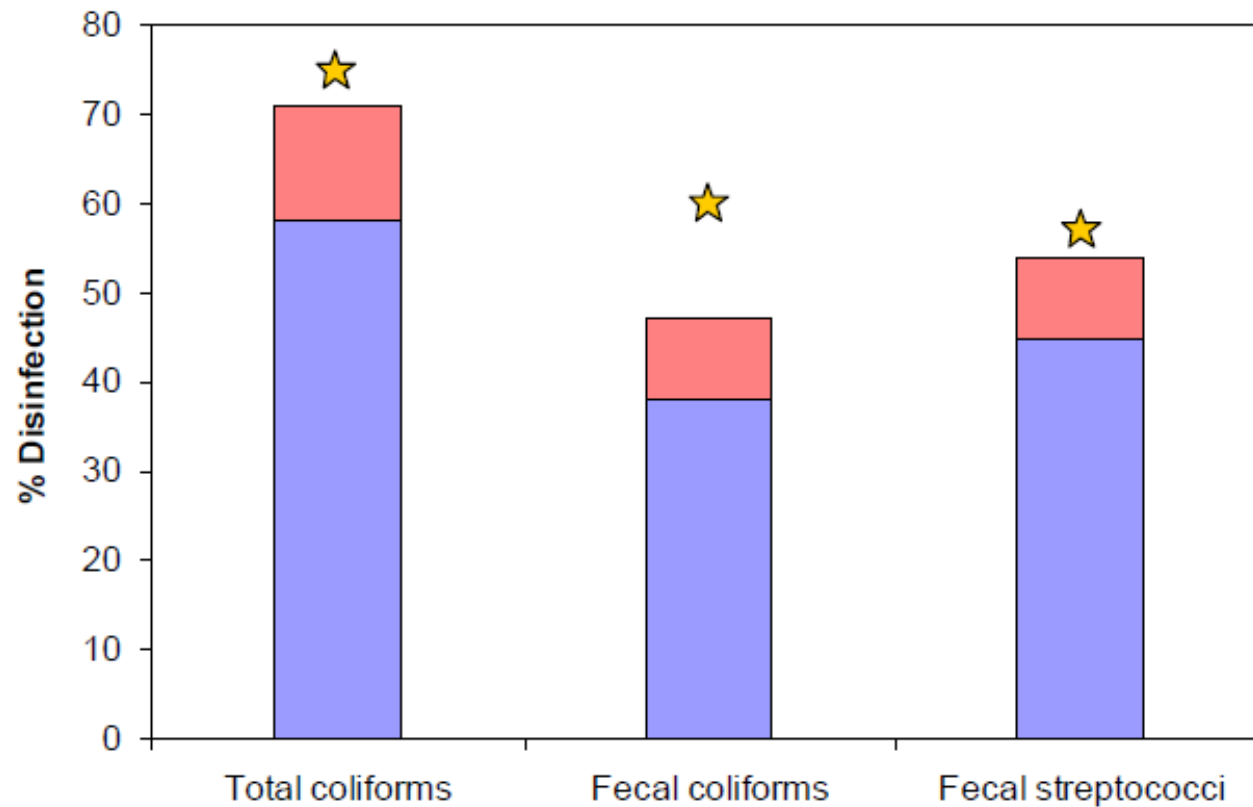
Mikrobiološka dezinfekcija



$p = 3.2 \text{ atm}$, prečnik otvora = 2mm



Mikrobiološka dezinfekcija



Odstranjivanje fenola

Rafinerija 6-500 ppm

Koksara 9-6800 ppm

Prerada uglja 28-3900 ppm

Petrohemija 2-1200 ppm

Postojeći postupci

Ekstakcija sa MIBK

Adsorpcija AC

Katalitička oksidacija sa vazduhom

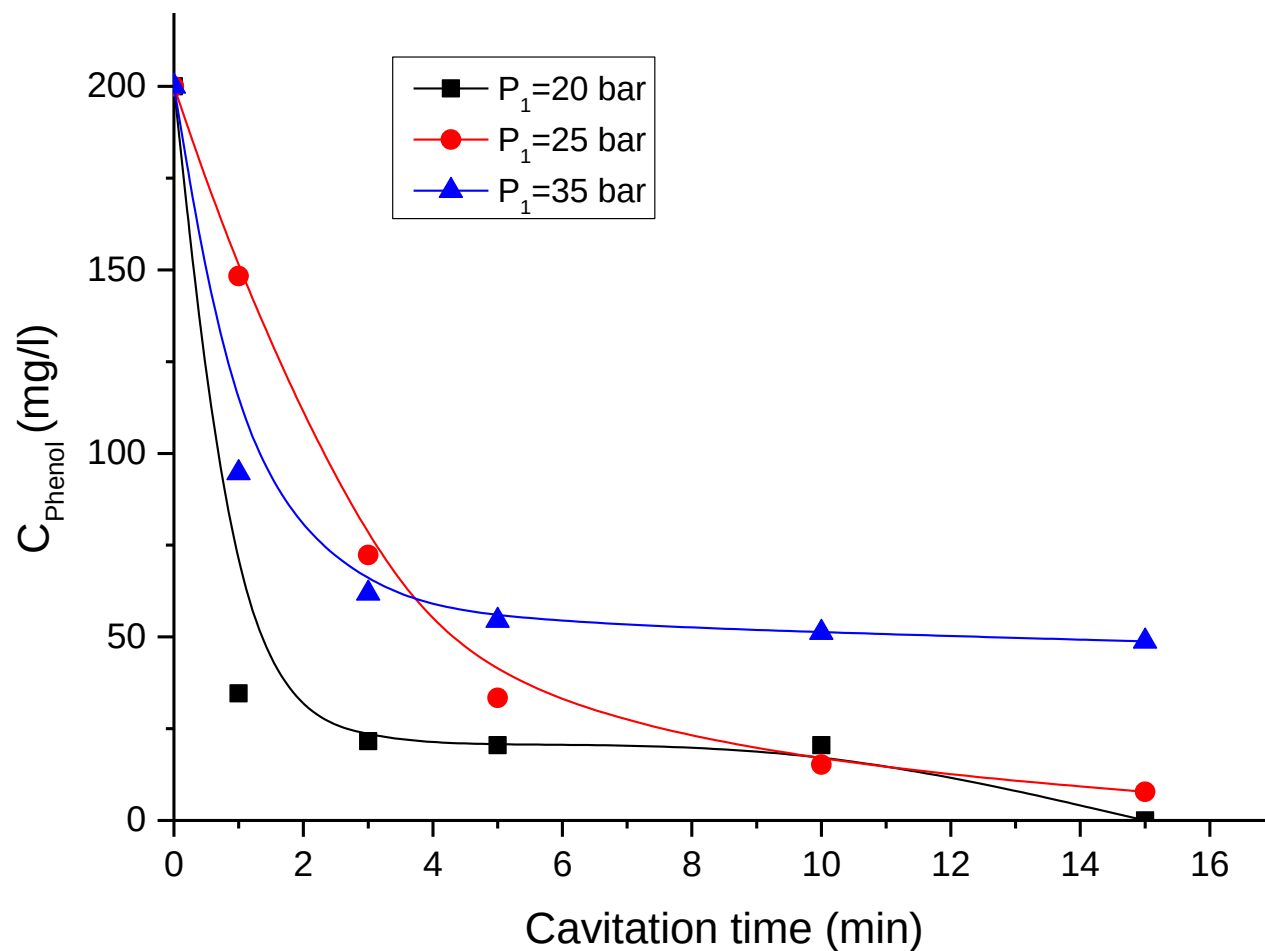
Hidrodinamička kavitacija (KSO)

Vreme t/min.	15 ppm	50 ppm	100ppm
1	0	47	95
3	0	1.2	25
5	0	0	8
10	0	0	0

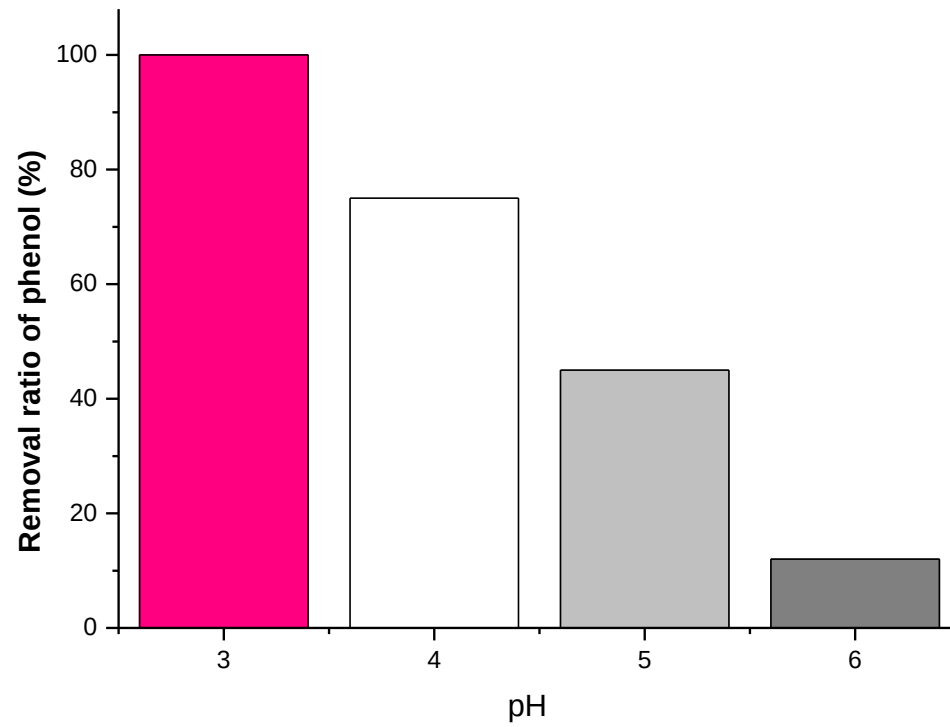
$P_1=20$ at, pH=3



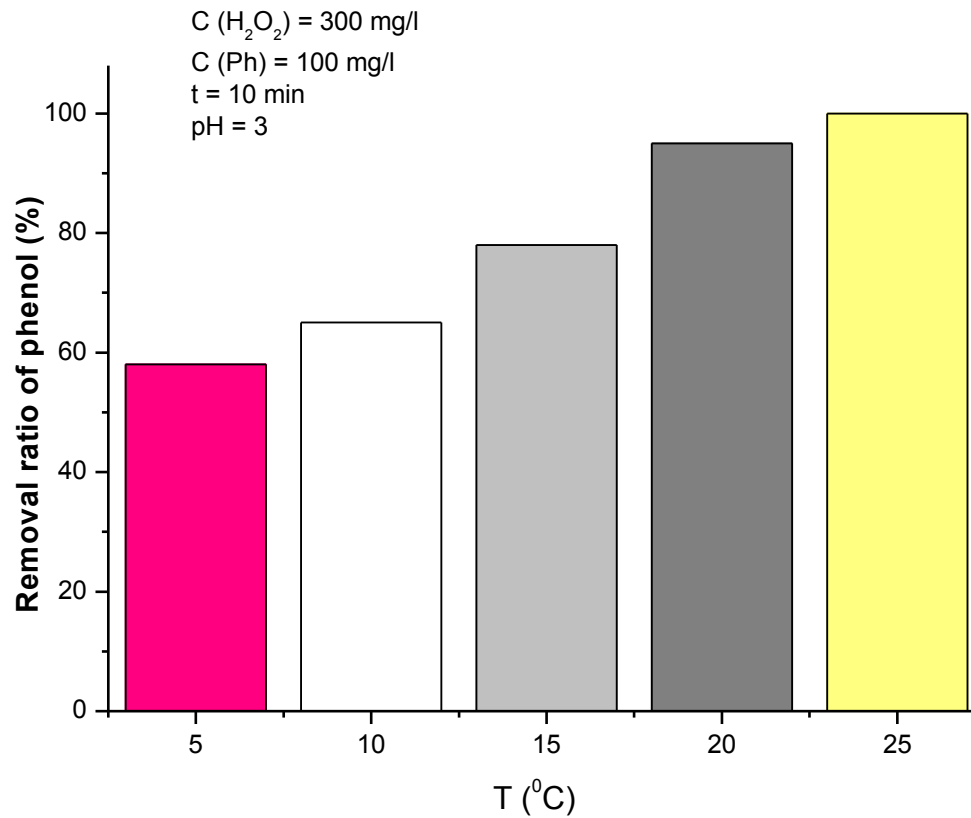
Uticaj ulaznog pritiska



Uticaj pH



Uticaj temperature



Hidroliza masti



Reakcioni uslovi: 200-300 °C, 15-30 at, t=2h

Kavitator: KSO, VTK, PRK

T=25-40 °C, t=1h

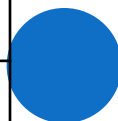


Transesterifikacija triglicerida

Konvencionalne tehnologije: $M=9$, $c=1\%$, $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2\text{h}$

Hidrodinamička kavitacija

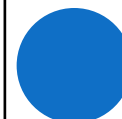
Autor	Uslovi	% MEMK	t (min)
J.Jl. (2006)	$M=6$, $c=1\%$, $T=45$	90	10
A.Pal. (2010)	$M04.5$, KSO	80	40
D.Ghayal. (2013)	$T=60$, KSO	94	20
M.Franke. (2014)	$M=3.5$, $c=0.5\%$, $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, US+KSO	90	10
B.Adnađević. (2007)	$M=3$, $c=1\%$, $T=25$, VTK, PRK	98	1



Esterifikacija ulja i masti

Konvencionalni uslovi: $M=20$, $c=1-20\%$, $T=60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=1-6\text{ h}$

Autor	Uslovi	SK %	t min.
M.Kelkar (2008)	$M=10$, $c=1\%$, $T=25$, KSO	98	100
O.Kozyuk (2010)	$M=200$, $c=0.5\%$, $T=60$, VTK	95	10
B.Adnađević (2012)	$M=9$, $c=10\%$, $T=25$, VTK, PRK	99.5	5



Poboljšanje kvaliteta goriva

- Kreking ugljovodoničnih frakcija
(C-H veza 322-435 kJ/mol, C-C veza 250-348 kJ/mol)
- Povećanje prilosa lakih frakcija Promptom (2008)
 - 1. Sniženje temperature početka destilacije 10-30°C
 - 2. Sniženje koeficijenta viskoznosti 2-5 jedinica
 - 3. Sniženje temperature paljenja 3-5°C Adnađević (2013)
 - 4. Sniženje potrošnje goriva u automobilima 20-30%



Proizvodnja jestivih ulja

Degumiranje (H_2O , kiselina, totalna)

Konvencionalni uslovi: $T = 80^\circ\text{C}$, $t = 1 \text{ h}$, 98 %

VTK, PRK: $T = 25^\circ\text{C}$, $t = 1 \text{ min}$, 99.5 %



Dispergovanje

- Proizvodnja lekova (oksitetraciklin)
 - Sintetički kaučuk
 - Proizvodnja betona
 - Proizvodnja deterdženta
 - Proizvodnja sokova
 - Proizvodnja stabilisane vodene suspenzije ugljenog praha
- 

Osnovna fizičko hemijska svojstva mazuta i eko mazuta

Svojstvo	Mazut	Eko mazut
C %	83-87	65-70
DTM MJ/kg	40-41	16-19
Koeficijent viskoznosti mPa s (60°C)	980	1000
Gustina kg/m ³	930-950	1250
Sadržaj pepela %	0,01-0,1	4-10
S (mas %)	0,1-4,5	0,2%

Resavica 21 MJ/kg

Pepeo 6,2 %

S 0,7%



Osnovne faze procesa dobijanja

- Lomljenje uglja
- Drobljenje (magnetni separator)
- Vlažno mlevenje (kugla mlin)
- Kavitaciono dobijanje

Gorionik

- Atomizer
- Sistem paljenja
- Stabilizator plamena
- Pepee



Prednosti

- Efikasnost sagorevanja 96-99 %
- Temperatura sagorevanja 1200-1300 °C
- Smanjenje emisije SO₂, NO_x
- Cena
- Investicije (vraća se nakon 5 meseci)
- Otpadne vode



Emulgovanje

- Farmaceutski proizvodi
- Aditivi za beton
- Homogenizacija i pasterizacija mleka
- Stabilne emulzije goriva



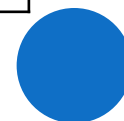
Ostale primene

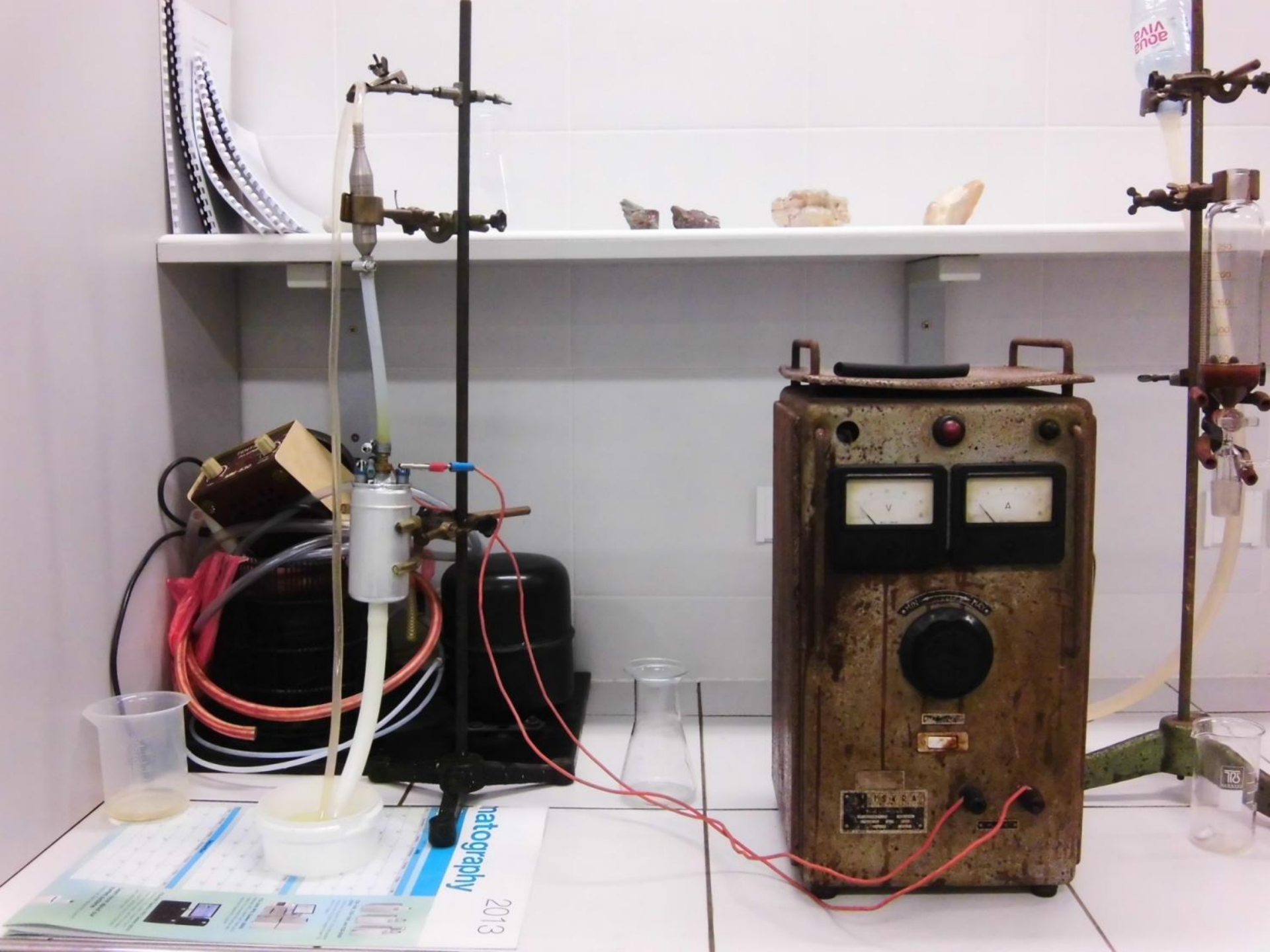
- Ekstrakcije (insulin, tanin, nikotin, kofein, lipidi, Al, Fe)
- Dobijanje biogoriva (bioetanol, dizel, bioulja)
- Dobijanje nanokristalne celuloze
- Novi materijali
- Nanohrana



Hemijski sastav %	Bitumenozni Ugalj	Lignit
SiO_2	20-60	15-45
Al_2O_3	5-35	10-20
Fe_2O_3	10-40	4-15
CaO	1-12	15-40
MgO	0-5	3-10
SO_3	0-4	0-10
Na_2O	0-4	0-6
K_2O	0-3	0-4

Hemijski sastav elektrofilterskog pepela





natography
2013



Rudarski institut d.o.o.
Beograd



Rudarski institut d.o.o. Beograd

HDKV - 1







