

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR



Cu

UDC 669.3  
ISSN 0351-0212

Broj 2 Volumen 35 2010

# BAKAR COPPER



**BAKAR** je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerađe bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i povezanih srodnih oblasti.  
Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

**Glavni i odgovorni urednik**

Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik,  
dopisni član IAS*  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor  
E-mail: [milenko.ljubojev@irmbor.co.rs](mailto:milenko.ljubojev@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-110

**Zamenik glavnog i odgovornog urednika**

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor  
E-mail: [ana.kostov@irmbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-108

**Urednik**

Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

**Prevodilac**

Nevenka Vukašinović, *prof.*

**Tehnički urednik**

Suzana Cvetković, *teh.*

**Priprema za štampu**

Ljiljana Mesarec, *teh.*

**Štamparija:** Grafomedtrade Bor

**Tiraž:** 100 primeraka

**Internet adresa**

[www.minininginstitutebor.com](http://www.minininginstitutebor.com)

**Izdavanje časopisa finansijski podržavaju**

Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj  
Republike Srbije  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

**ISSN 0351-0212**

*Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.*

*Naučni časopis kategorizacije M53 za 2010.*

**Izdavač**

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor  
19210 Bor, Zeleni bulevar 35  
E-mail: [nti@irmbor.co.rs](mailto:nti@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-254

**Sva prava zadržana.**

**Uredivački odbor**

Prof. dr Vlastimir Trujić, viši naučni saradnik

*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*

Prof. dr Milan Antonijević, red. prof.

*Tehnički fakultet Bor*

Dr Mile Bugarin, viši naučni saradnik

*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*

Prof. dr Tatjana Volkov Husović, vanr. prof.

*Tehnološko-metalurški fakultet Beograd*

Doc. dr Milica Gvozdenović, docent

*Tehnološko-metalurški fakultet Beograd*

Doc. dr Mile Dimitrijević, docent

*Tehnički fakultet Bor*

Prof. dr Dragana Živković, red. prof.

*Tehnički fakultet Bor*

Prof. dr Nedeljko Magdalinić, red. prof.

*Fakultet za menadžment Zaječar*

Dr Lidija Mančić, viši naučni saradnik

*Institut tehničkih nauka SANU*

Prof. dr Desimir Marković, red. prof.

*Tehnički fakultet Bor*

Prof. dr Duško Minić, vanr. prof.

*Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica*

Dr Milanče Mitovski

*RTB - TIR Bor*

Dr Miroslav Sokić, naučni saradnik

*Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih*

*mineralnih sirovina Beograd*

Prof. dr Jasmina Stevanović, vanr. prof.

*IHTM-Centar za elektrohemiju Beograd*

Dr Srećko Stopić

*RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka*

Dr Nadežda Talijan, naučni savetnik

*Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju*

*Beograd*

Dr Viša Tasić, naučni saradnik

*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*

Dr Dejan Trifunović

*Tehnološko-metalurški fakultet Beograd*

---

---

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

**Editor-in-Chief**

Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow, associate member of ECS*

Mining and Metallurgy Institute Bor  
E-mail: [milenko.ljubojev@irmbor.co.rs](mailto:milenko.ljubojev@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-110

**Co-Editor**

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*  
Mining and Metallurgy Institute Bor  
E-mail: [ana.kostov@irmbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-108

**Editor**

Vesna Marjanović, *B.Eng.*

**English Translation**

Nevenka Vukašinović

**Technical Editor**

Suzana Cvetković

**Preprinting**

Ljiljana Mesarec

**Printed in:** Grafomedtrade Bor

**Circulation:** 100 copies

**Web site**

[www.mininginstitutebor.com](http://www.mininginstitutebor.com)

**COPPER is financially supported by**

The Ministry of Science and Technological Development of the Republic Serbia  
Mining and Metallurgy Institute Bor

**ISSN 0351-0212**

*Journal indexing in SCIndex and ISI.*  
*Scientific Journal categorization M53 for 2010.*

**Published by**

Mining and Metallurgy Institute Bor  
19210 Bor, Zeleni bulevar 35  
E-mail: [nti@irmbor.co.rs](mailto:nti@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-254

**All rights reserved.**

**Editorial Board**

Prof.Ph.D. Vlastimir Trujić, *Senior Research Associate*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Prof.Ph.D. Milan Antonijević,  
*Technical Faculty Bor*  
Prof.D. Mile Bugarin, *Senior Research Associate*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Prof.Ph.D. Tatjana Volkov Husović  
*Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade*  
Ph.D. Milica Gvozdenović  
*Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade*  
Ph.D. Mile Dimitrijević  
*Technical Faculty Bor*  
Prof.Ph.D. Dragana Živković  
*Technical Faculty Bor*  
Prof.Ph.D. Nedeljko Magdalinović  
*Faculty of Management Zaječar*  
Ph.D. Lidija Mančić, *Senior Research Associate*  
*Institute of Technical Science of SASA*  
Prof.Ph.D. Desimir Marković  
*Technical Faculty Bor*  
Prof.Ph.D. Duško Minić  
*Faculty of Technical Sciences Kosovska Mitrovica*  
Ph.D. Milanče Mitovski  
*RTB - TIR Bor*  
Ph.D. Miroslav Sokić, *Research Associate*  
*Institute for Technology of Nuclear and Other Raw Materials Beograd*  
Prof.Ph.D. Jasmina Stevanović  
*IHTM-Department of Electrochemistry Belgrade*  
Ph.D. Srećko Stopić  
*RWTH Aachen, IME Aachen, Germany*  
Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow*  
*Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade*  
Ph.D. Viša Tasić, *Research Associate*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Ph.D. Dejan Trifunović  
*Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade*

---

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 681.51:626.01(045)=861

STRUČNI RAD

*Oblast: Mašinstvo*

### **PRIMENA PROGRAMA „PIPE PAK“ ZA PRORAČUN KOMPENZACIJE TEMPERATURSKIH DILATACIJA ZA 3-OSNI SISTEM NA KOLENU OD 90°**

### **APPLICATION OF SOFTWARE „PIPE PAK“ FOR CALCULATION OF COMPENSATION OF TEMPERATURE DILATATIONS FOR 3-AXES SYSTEM AT 90° ELBOW**

Branislav Rajković<sup>1</sup>, Zoran Ilić<sup>1</sup>, Vesna Marjanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut za rударство и металургију Бор

#### **Izvod**

*U ovom radu je, na primeru kompenzacije temperaturskih dilatacija parovodne instalacije 3-osnim sistemom na kolenu od 90°, data uporedna analiza rezultata proračuna dobijenih analitičkim proračunom i korišćenjem programa „Pipe Pak“. Analitički postupak proračuna izložen je u celini eksplicitnim formulama (I), dok su rezultati dobijeni softverom „Pipe Pak“ dati tabelarno i grafički. Na ovaj način su predstavljene mogućnosti ovog kompjuterskog programa za jedan određen slučaj ravanske kompenzacije temperaturskih dilatacija.*

**Ključне речи:** kompenzacija temperaturskih dilatacija, 3-osni sistem na kolenu od 90°, parovodna instalacija, softver „Pipe Pak“.

#### **Abstract**

*In this work, at the example of compensation of temperature dilatations of steam pipeline installation by 3-axes system at 90° elbow, it is given the comparative analysis of calculation results obtained by analytical calculation and by use of program “Pipe Pak”. Analytical calculation procedure is presented purely by explicit formulae (I), while the results obtained by software “Pipe Pak” are given by tables and graphics. In that way the possibilities of the computer program are shown for a definite case of temperature dilatations compensation in plane.*

**Key words:** compensation of temperature dilatations, 3-axes system at 90° elbow, steam pipeline installation, software “Pipe Pak”.

---

<sup>1</sup> E-mail: branislav.rajkovic@irmbor.co.rs

## UVOD

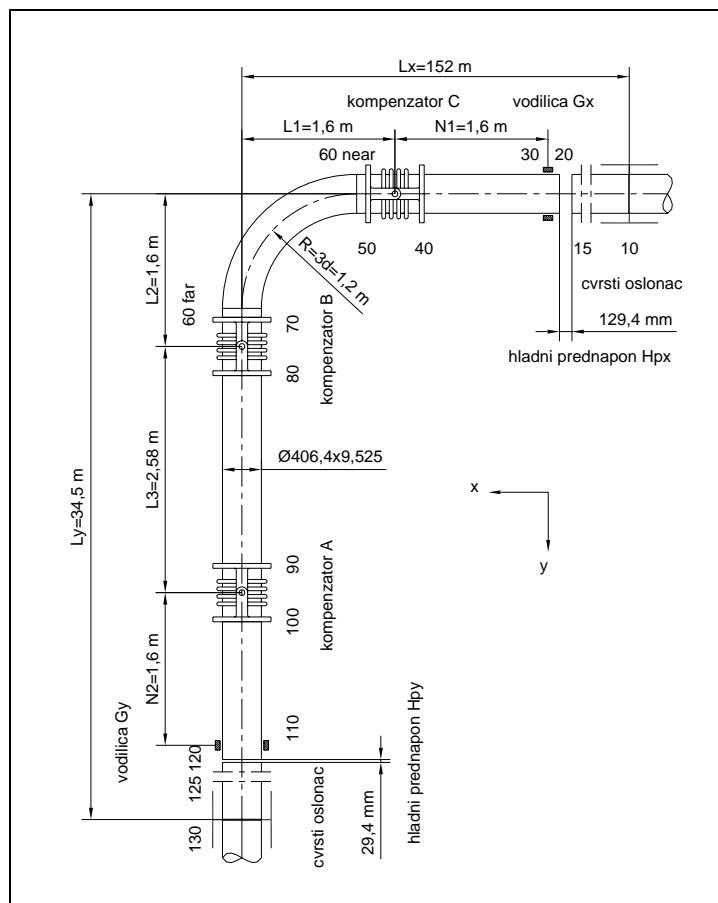
Da bi sile i naprezanja u cevovodu ostali u dozvoljenim granicama pri temperaturskim dilatacijama primenjuje se kompenzacija temperaturskih dilatacija kompenzatorima ili samokompenzacijom. Troosni sistem na kolenu od  $90^\circ$  omogućava preuzimanje istezanja dva duga cevovoda u dva pravca pod uglom od  $90^\circ$  upotreboom tri jednozglobna kompenzatora. Osim jednozglobnih kompenzatora u praksi najčešće primenu za kompenzaciju temperaturskih dilatacija imaju aksijalni, dvozglobni, dvostruko spregnuti i nespregnuti kao i kardanski kompenzatori. U ovom razmatranju zanemariće se naprezanja od ostalih sila (sile od mehaničkog delovanja transportovanog fluida, sile otpora pomeranja pokretnih oslonaca, težinska opterećenja i sile usled delovanja veta) koje deluju na neukopane cevovode (2).

## TEHNIČKI OPIS

Na slici 1. data je jedna ravanska konfiguracija cevovoda između uklještenih nepokretnih oslonaca koja se naziva troosni sistem na kolenu od  $90^\circ$ . Ona se sastoji od deonice konstantnog poprečnog preseka d od istog materijala koja se lomi pod uglom od  $90^\circ$ . Dužine jednog i drugog pravolinijskog kraka ove ravanske konfiguracije su  $L_x$  i  $L_y$  i u opštem slučaju ne moraju da budu jednake, a poluprečnik ose cevnog luka je  $R=3d$ . Duž pravolinijskih krakova  $L_x$  i  $L_y$  postavljene su ose koordinatnog sistema x i y. Na kraku  $L_x$  na rastojanju  $L_1$  od presečne tačke osa deonica  $L_x$  i  $L_y$  nalazi se jednozglobni kompenzator C, a na rastojanju  $N_1=4d$  od njega nalazi se usmeravajući oslonac-vodilica  $G_x$ . Uloga vodilice je da održava cev u pravcu i opire se tendenciji da se cev savije ili iskrene izvan tog pravca. Na kraku  $L_y$  na rastojanju  $L_2$  (usvaja se konstruktivno što je moguće manje) od presečne tačke osa deonica  $L_x$  i  $L_y$  nalazi se jednozglobni kompenzator B, a na rastojanju  $L_3$  od njega kompenzator A. Drugi usmeravajući oslonac-vodilica  $G_y$  nalazi se na rastojanju  $N_2=4d$  od kompenzatora A. Da bi se maksimalno iskoristila sposobnost ukupne dilatacije kompenzatora potrebno je izvršiti prednaprezanje kompenzatora. Tehnika ugradnje sastoji se u ostavljanju „džepa“ na liniji cevovoda i ugradnji kompenzatora u neutralnom položaju, a kada je celi sistem instaliran treba privlačenjem spojiti cevovod postavljajući tako sistem u ispravan hladno razvučeni položaj. Veličine hladnog prednapona u kraku  $L_x$  i  $L_y$  su respektivno  $H_{px}$  i  $H_{py}$ . Na cevovodu su obeležene karakteristične tačke koje se definišu prilikom unosa podataka u programu „Pipe Pak“. Postupak analitičkog proračuna obuhvata određivanje temperaturskih dilatacija i veličina hladnog prednapona, a nadalje određivanje sila i momenata na zglobovima i osloncima.

Za razliku od analitičkog proračuna prilikom rada sa softverom „Pipe Pak“

posao projektanta se svodi na unošenje ulaznih parametara i crtanje konfiguracije sa svim pripadajućim komponentama u grafičkom okruženju programa. Ulagani parametri obuhvataju osim geometrijskih parametara konfiguracije i karakteristike cevi (prečnik, debljina zida itd.), karakteristike materijala (modul elastičnosti, koeficijent linearne širenja itd.), karakteristike opterećenja (temperatura, pritisak itd.), karakteristike kompenzatora (konstanta opružnog delovanja, pomeranje itd.) i karakteristike oslonaca (krutost, pomeranje itd.). Izlazni parametri su grafički prikaz deformacije cevovoda, pomeranja i napona, odnosno tabelarni prikaz pomeranja, napona i sila i momenata.



Slika 1. Kompenzacija za 3-osni sistem na kolenu od  $90^\circ$

## PRORAČUN

1. Ulazni podaci:

- Spoljašnji prečnik cevi:  $D = 406,4[\text{mm}]$
- Debljina zida cevi:  $s = 9,525[\text{mm}]$
- Dužina dužeg pravolinijskog kraka:  $L_x = 152[\text{m}]$
- Dužina kraćeg pravolinijskog kraka:  $L_y = 34,5[\text{m}]$
- Poluprečnik krvine:  $R = 1,2[\text{m}]$

- Karakteristične dužine:  $L_1 = 1,6[\text{m}]$ ,  $L_2 = 1,6[\text{m}]$ ,  $L_3 = 1,6[\text{m}]$ ,  $N_1 = 1,6[\text{m}]$ ,  $N_2 = 1,6[\text{m}]$ ,

- Karakteristične računske dužine:  
 $L_{xrač} = L_x - L_1 = 150,4[\text{m}]$   
 $L_{yrač} = L_y - L_2 - L_3 = 30,32[\text{m}]$

- Materijal cevi: niskougljenični čelik

- Ambijentalna temperatura:  $t_{ugr} = 20[^{\circ}\text{C}]$
- Maksimalna temperatura:  $t_{\max} = 165[^{\circ}\text{C}]$
- Minimalna temperatura:  $t_{\min} = -20[^{\circ}\text{C}]$

- Dilatacija pri grejanju od ambijentalne do maksimalne temperature:

$$\Delta_g = 1,729 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]$$

- Dilatacija pri hlađenju od ambijentalne do minimalne temperature:

$$\Delta_h = 0,414 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]$$

Karakteristike jednozglobnog kompenzatora:

- tip HS6/400/16/T/1
- ugradbena dužina  $L = 610[\text{mm}]$
- ugao zaokretanja  $\theta = 16[^{\circ}] = \pm 8[^{\circ}]$
- sila opružnog delovanja  $k = 148,1 \left[ \frac{\text{N}}{\text{o}} \right]$

2. Dilatacije pri grejanju od ambijentalne do maksimalne temperature:

$$\Delta_{xg} = \Delta_g \cdot L_{xrač} = 260,04[\text{mm}]$$

$$\Delta_{yg} = \Delta_g \cdot L_{yrač} = 52,42[\text{mm}]$$

3. Dilatacije pri hlađenju od ambijentalne do minimalne temperature:

$$\Delta_{xh} = \Delta_h \cdot L_{xrač} = 62,3 \text{ [mm]}$$

$$\Delta_{yh} = \Delta_g \cdot L_{yrač} = 12,55 \text{ [mm]}$$

4. Hladno prednaprezanje:

$$H_{px} = \frac{\Delta_{xg} - \Delta_{xh}}{2} = 99 \text{ [mm]}$$

$$H_{py} = \frac{\Delta_{yg} - \Delta_{yh}}{2} = 20 \text{ [mm]}$$

5. Ugaona zakretanja kompenzatora:

$$\varepsilon_C = \arcsin \frac{\Delta_{yg} - H_{py}}{L_1} = 1,161 \text{ [°]}$$

$$\varepsilon_A = \arcsin \frac{(\Delta_{xg} - H_{px}) \cdot L_1 + (\Delta_{yg} - H_{py}) \cdot L_2}{L_1 \cdot L_3} = 4,3 \text{ [°]}$$

$$\varepsilon_B = \varepsilon_A + \varepsilon_C = 5,461 \text{ [°]}$$

6. Momeniti kompenzatora:

$$M_A = k \cdot \varepsilon_A = 636,8 \text{ [Nm]}$$

$$M_B = k \cdot \varepsilon_B = 808,8 \text{ [Nm]}$$

$$M_C = k \cdot \varepsilon_C = 171,9 \text{ [Nm]}$$

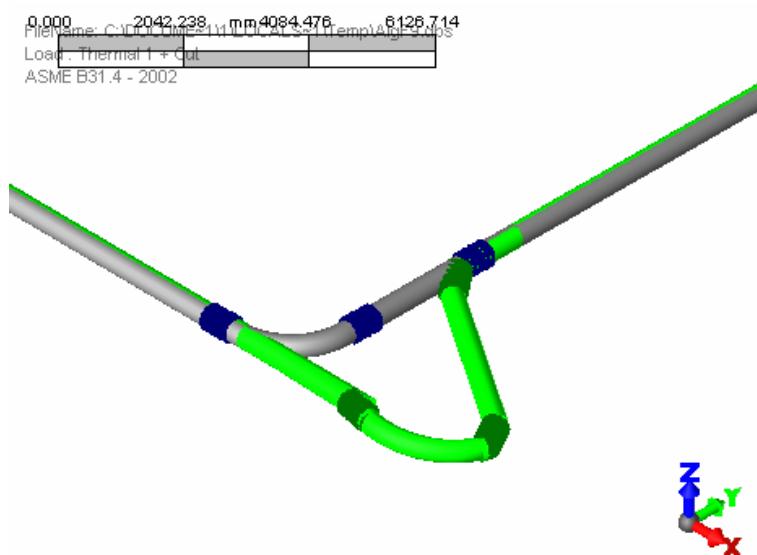
7. Sile i momenti na čvrste oslonce i vodilice:

$$F_{Ax} = F_{Gy} = \frac{M_A + M_B}{L_3} = 560,3 \text{ [N]}$$

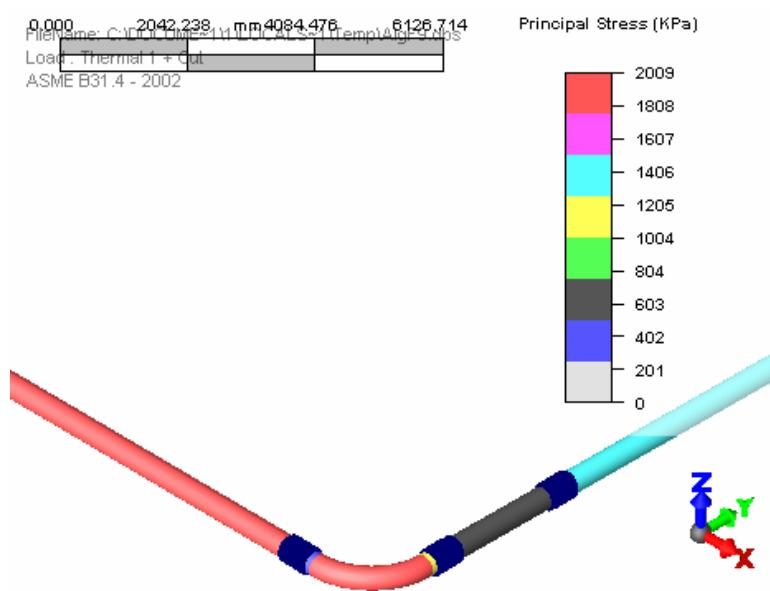
$$F_{Ay} = F_{Gx} = \frac{M_B + M_C}{L_1} + \frac{F_{Gy} \cdot L_2}{L_1} = 1173,2 \text{ [N]}$$

$$M_{Gx} = M_C + F_{Gx} \cdot N_1 = 2049 \text{ [Nm]}$$

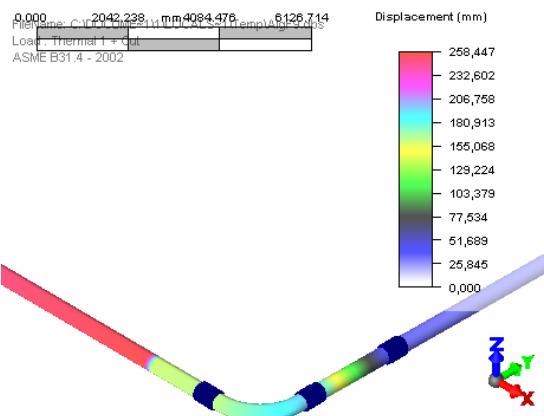
$$M_{Gy} = M_A + F_{Gy} \cdot N_2 = 1533,3 \text{ [Nm]}$$



**Slika 2.** Deformacija cevovoda usled temperaturskih dilatacija pri zagrevanju



**Slika 3.** Naponi u cevovodu usled temperaturskih dilatacija pri zagrevanju



**Slika 4.** Pomeranja cevovoda usled temperaturskih dilatacija pri zagrevanju

**Tabela 1.** Naponi u cevovodu usled temperaturskih dilatacija pri zagrevanju

System Stress (ASME B31.4)										
Load : Thermal 1 + Cut										
Point Name	In-Plane SIF	Out-Plane SIF	Section Modulus	Stresses (KPa)					Code	Allowable
				Hoop	Longitudinal	Principal				
10	1.00	1.00	1151363.63	0.00	989.40	989.40	N/A	N/A		
15	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1926.45	1926.45	N/A	N/A		
20	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1930.24	1930.24	N/A	N/A		
30	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1825.24	1825.24	N/A	N/A		
40	1.00	1.00	1151363.63	0.00	517.94	517.94	N/A	N/A		
50	1.00	1.00	1151363.63	0.00	219.87	219.87	N/A	N/A		
60.Near	2.05	1.71	1151363.63	0.00	604.95	604.95	N/A	N/A		
60.Far	2.05	1.71	1151363.63	0.00	2008.92	2008.92	N/A	N/A		
70	1.00	1.00	1151363.63	0.00	983.11	983.11	N/A	N/A		
80	1.00	1.00	1151363.63	0.00	677.06	677.06	N/A	N/A		
90	1.00	1.00	1151363.63	0.00	514.93	514.93	N/A	N/A		
100	1.00	1.00	1151363.63	0.00	820.98	820.98	N/A	N/A		
110	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1445.62	1445.62	N/A	N/A		
120	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1438.62	1438.62	N/A	N/A		
125	1.00	1.00	1151363.63	0.00	1431.61	1431.61	N/A	N/A		
130	1.00	1.00	1151363.63	0.00	772.96	772.96	N/A	N/A		

**Tabela 2.** Pomeranja cevovoda usled temperaturskih dilatacija

SYSTEM DEFLECTIONS LOAD : THERMAL 1 + CUT						
Point Name	Displacements(mm)			Rotations(degree)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
10	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	258.447	0.338	0.000	0.000	0.000	-0.096
20	159.795	-0.000	0.000	0.000	0.000	-0.097
30	159.969	-0.170	0.000	0.000	0.000	-0.097
40	162.135	-2.311	0.000	0.000	0.000	-0.099
50	162.135	-9.535	0.000	0.000	0.000	-1.258
60.Near	162.300	-11.620	0.000	0.000	0.000	-1.258
60.Far	190.584	-35.804	0.000	0.000	0.000	-1.246
70	192.649	-35.639	0.000	0.000	0.000	-1.245
80	175.769	-35.639	0.000	0.000	0.000	4.416
90	23.906	-32.212	0.000	0.000	0.000	4.417
100	0.314	-32.212	0.000	0.000	0.000	0.015
110	0.000	-30.046	0.000	0.000	0.000	0.013
120	-0.023	-29.872	0.000	0.000	0.000	0.013
125	-0.046	-29.699	0.000	0.000	0.000	0.013
130	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000

**Tabela 3.** Sile i momenti u cevovodu usled temperaturskih dilatacija

FORCES AND MOMENTS IN GLOBAL COORDINATE SYSTEM LOAD : THERMAL 1 + CUT						
Point Name	Forces ( Newton )			Moments ( Newton-m )		
	X	Y	Z	X	Y	Z
10	577.66	-21.85	0.00	0.00	0.00	-1083.16
15	-577.66	21.85	0.00	0.00	0.00	-2162.04
20	-577.66	21.85	0.00	0.00	0.00	-2166.41
30	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-2045.51
40	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-540.33
50	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	197.15
60.Near	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	312.00
60.Far	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	1069.58

<b>70</b>	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	1014.70
<b>80</b>	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	662.33
<b>90</b>	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-475.66
<b>100</b>	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-828.04
<b>110</b>	-577.66	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-1547.23
<b>110</b>	-80.64	1208.98	0.00	0.00	0.00	1547.23
<b>120</b>	80.64	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-1539.16
<b>125</b>	80.64	-1208.98	0.00	0.00	0.00	-1531.10
<b>130</b>	80.64	-1208.98	0.00	0.00	0.00	772.75

## DISKUSIJA PRORAČUNA

Rezultati proračuna dobijeni analitičkim postupkom sa jedne strane i primenom programa „Pipe Pak“ sa druge strane, pokazuju neznatna odstupanja. Ova odstupanja data su u tabeli 4.

**Tabela 4.** Relativna odstupanja rezultata dobijenih analitički i programom „Pipe Pak“

Naziv veličine	Oznaka veličine	Analitička vrednost	Programska vrednost	Relativna greška
Ugao zakretanja kompenzatora A	$\varepsilon_A$	4,3°	4,402°	2,3%
Ugao zakretanja kompenzatora B	$\varepsilon_B$	5,461°	5,661°	3,5%
Ugao zakretanja kompenzatora C	$\varepsilon_C$	1,161°	1,159°	0%
Momenat kompenzatora A	$M_A$	636,8 Nm	651,85 Nm	2,3%
Momenat kompenzatora B	$M_B$	808,8 Nm	838,515 Nm	3,5%
Momenat kompenzatora A	$M_A$	171,9 Nm	171,59 Nm	0%
Transverzalna sila na vodilici $G_y$	$F_{Gy}=F_{Ax}$	560,3 N	577,66 N	3%
Transverzalna sila na vodilici $G_x$	$F_{Gx}=F_{Ay}$	1173,2 N	1208,98 N	2,9%
Momenat na vodilici $G_x$	$M_{Gx}$	2049 Nm	2105,96 Nm	2,7%
Momenat na vodilici $G_y$	$M_{Gy}$	1533,3 Nm	1543,2 Nm	0,6%

Relativna odstupanja rezultata računatih po obe metode su manja od 3,5%. Ova odstupanja proizilaze iz približnih formula korišćenih u analitičkom proračunu za određivanje pomeranja cevovoda i zakretanja kompenzatora.

## ZAKLJUČAK

Prilikom izbora između ne malog broj programa za proračun cevovoda koji se u zadnje vreme pojavljuju na tržištu uvek je dobro izvršiti, u meri u kojoj je to moguće, proveru u cilju kontrole tačnosti rezultata i sagledavanja prednosti i nedostataka pojedinih programa. U ovom radu je, bez ambicije da se obuhvate sve mogućnosti programa „Pipe Pak“, izvršena ovakva jedna provera za konkretni slučaj kompenzacije parovoda za troosni sistem na kolenu od  $90^\circ$  koja pokazuje da program daje dobre i u praksi upotrebljive rezultate. Primenom programa „Pipe Pak“ projektantu je znatno olakšan proračun kompenzacije temperaturskih dilatacija koji za složenije konfiguracije može biti vrlo komplikovan.

## LITERATURA

- [1] Tvornica kompenzatora „Đuro Đaković-Teddington“: Vodič za projektante s katalogom standardnih valovitih kompenzatora iz nerđajućih čelika, 1977. god.
- [2] M. Markoski: Cevni vodovi, Mašinski fakultet, Beograd, 1989. god.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 669.01.002.2:504.06(045)=861

NAUČNI RAD

*Oblast: Energetska efikasnost*

### **UTICAJ PROIZVODNJE BAKRA NA EFEKAT „STAKLENE“ BAŠTE I „KISELE“ KIŠE**

### **COPPER PRODUCTION INFLUENCE INTO EFFECTS “GREENHOUSE” GASES EFFECTS AND “ACID” RAINS**

Dr Milanče Mitovski<sup>1</sup>, Aleksandra Mitovski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RTB-BOR GRUPA,

<sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

#### **Izvod**

*Proizvodnja bakra pirometalurškom ekstrakcijom je veliki zagadivač životne sredine, ukoliko se predhodno gasoviti proizvodi ne očiste prisustva sumpor dioksida i poletine, izaziva pojavu „kisele“ kiše (Acidification Potential - AP). Takođe, prisustvo ugljendioksida, ugljovodonika i azotovih oksida utiču na pojavu efekata „staklene“ bašte, zbog globalnog zagrevanja planete (Global Warming Potential - GWP).*

*U ovom radu, na konkretnom slučaju, ustanovljeni su potencijalni „efekti“ zagađivanja životne sredine Bora (pojave „kisele“ kiše) i efekti „staklene“ bašte kao posledica proizvodnje bakra. Ovo je na neki način pionirski poduhvat, bar što se tiče proizvodnje bakra u Republici Srbiji.*

*Kao izvor zagađivača i izazivača efekata „staklene“ bašte razmatrani su svi energenti: električna energija (posredno, jer se ona proizvodi izvan Bora i zagađivanje životne sredine je izvan Bora), goriva, hemijske reakcije u odvijanju procesa, kao i proizvodnja toplotne energije u Termoelektrani za tehnološke i toplifikacione potrebe u proizvodnji bakra.*

*„Kisele“ kiše postaju jedan od najvažnijih problema životne sredine, a rezultat su onečišćenosti atmosfere nastale zbog bržeg industrijskog razvoja. Uzroci su oslobođanje oksida sumpora i azota, koji uz određene hemijske reakcije prelaze u sulfate i nitratre, te mokrim ili suvim taloženjem dolaze do tla. Deluju na jezera, reke, celokupni životinjski i biljni svet, uključujući i sva dobra stvorena ljudskom rukom.*

*Racionalno gazdovanje energijom u proizvodnji bakra direktno utiče, osim na ekonomičnost proizvodnje, na obim zagađenja životne sredine i podsticaja efekata „staklene“ bašte. Ekvivalenti zagađivači  $SO_2$  i  $CO_2$  su iskazani kao fizičke koncentracije imisije po jedinici mase proizvedenog bakra za 2008. godinu, a izračunati su na osnovu stehiometrijskih odnosa, bilansa mase i energije i merenja fizičkih veličina.*

---

<sup>1</sup> E-mail:[mitovskimilance@nadlanu.com](mailto:mitovskimilance@nadlanu.com)

*U ovom radu posebna pažnja je posvećena na zagađenje životne sredine sumpor dioksidom, poletinom i efektima „staklene“ bašte i aktuelizirana je ova tema za uslove proizvodnje bakra. Zagađenje životne sredine teškim metalima i otpadnom vodom nije tema ovog rada.*

**Ključne reči:** zagađenje, efekat „staklene“ bašte, „kisele“ kiše, gorivo, bakar, ugljendioksid, sumpor dioksid

## Abstract

*Copper production by pyrometallurgical extraction has been great environmental polluter. If the gaseous products haven't been previously purified from sulfur dioxide and flying dust, it can cause appearance of "acid" rain (Acidification Potential-AP). Also, the presence of carbon dioxide, hydrocarbons and nitrogen oxides affect the appearance of the "greenhouse" gases effects, and consequently, the planet global warming (Global Warming Potential-GWP).*

*Technological scheme of pyrometallurgical copper production is composed of following operations: roasting, smelting, converting and fire refining.*

*Charge (copper concentrate and welding flux – quartz and limestone) in presence of air is being roasted in Dorr Oliver fluo-solid reactor, and further, melted in reverberatory furnace. Product from this phase, copper-sulfur matte is transformed into blister copper in Pierce Smith converter. Slag from reverberatory furnace is transported to landfill. Blister copper, the product of conversion, is processed in anode furnaces with air, fuel and reducing matter (beech tree) into anode copper (99,5% pure copper). Anode copper, after casting in special anode shape goes further to electrolytic refining, with final product – cathode copper, with 99,99% Cu purity.*

*In this work the research about the influence of copper production on the quantity and quality of the environment is carried out. Special attention is paid to elements that cause the "greenhouse" gas effects and "acid" rain: carbon dioxide, sulfur dioxide and flying dust.*

*For the observed business year 2008, the equivalent of emissions from metallurgical furnaces is obtained: sulfur dioxide  $1.363,594 \text{ m}^3 \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}}$ , carbon dioxide  $2.993,424 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{t}_{\text{kb}}$  and nitrogen  $7.556,419 \text{ m}^3 \text{ N}_2/\text{t}_{\text{kb}}$  or in total:  $46.022.425,19 \text{ m}^3 \text{ SO}_2/\text{a}$ ,  $101.030.535,6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{a}$ ,  $255.035.390,4 \text{ m}^3 \text{ N}_2/\text{a}$  and 547 tons of flying dust.*

*The imission of pollutants, in the same period amounted of: sulfur dioxide  $1.025,583 \text{ m}^3 \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}}$ , carbon dioxide  $2.993,424 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{t}_{\text{kb}}$ , nitrogen  $7.556,419 \text{ m}^3 \text{ N}_2/\text{t}_{\text{kb}}$  and flying dust  $16,207 \text{ kg/t}_{\text{kb}}$ , or the total amount for the observed year:  $34.614.274,41 \text{ m}^3 \text{ SO}_2$ ,  $101.030.535,6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$ , nitrogen  $255.035.390,4 \text{ m}^3 \text{ N}_2$  and flying dust 547 t. Based on this, efficiency use of sulfur, by producing sulfuric acid, reached a value of 35,60% and 98,75% would be possible.*

*The construction of "new" smelter in Bor by autogenous technological process should be expected to eliminate sulfur dioxide and flying dust emission and reducing emission of carbon dioxide and nitrogen.*

**Key words:** pollutions, greenhouse effect, acidification potential, fuel, copper, carbon dioxide, sulfur dioxide

## UVOD

Doskorašnja najzastupljenija tehnološka šema proizvodnje bakra u svetu (koja još uvek funkcioniše u RTB-Bor grupi) zasniva se na: prženju šarže u fluosolid reaktoru, topljenju prženca u plamenoj peći, konvertovanju bakrenca u Peirce Smith konvertorima za proizvodnju blister bakra, plamenoj rafinaciji do anodnog bakra i elektrolitičkoj rafinaciji do katodnog bakra. Po ovoj tehnologiji, 2000. godine je 14,6% svetske proizvodnje bakra dobijeno ovim postupkom. Pri tome, se troše skoro sve vrste fosilnih goriva (32-42 GJ/t katodnog bakra). Neke metalurške peći proizvode gasovite proizvode sa nižim sadržajem SO<sub>2</sub> iz kojih je proizvodnja sumporne kiseline ili drugih proizvoda sa niskom efikasnošću. Sadržaj sumpor dioksida u gasovima iz plamenih peći je oko 0,5-1,5 vol% i najčešće se ispuštaju u atmosferu (osim, na primer u topionici *Onahama Smelting and Refining CO., LTD, Japan*, gde se iz gasova plamene peći proizvodi gips oko 32.000 t mesečno), kod Flash peći oko 30%SO<sub>2</sub>, INCO postupak do 80% SO<sub>2</sub> i gasovi služe za proizvodnju sumporne kiseline, tečnog sumpor dioksida i elementarnog sumpora.



Sl. 1. Detalj topionice bakra

U principu najveći zagađivač vazduha je sumpor dioksid, mada, u zavisnosti od sadržaja rude, gde se nalaze pored ostalih, olovo, cink, nikl, kadmijum, arsen i drugi metali. Emisija sumpor dioksida, može biti zastupljena kao zagađivač vazduha u okolini, u granicama 4-2000 kg/t bakra. Otpadna voda iz primarne proizvodnje bakra, kao suvi ostatak, može sadržati koncentracije bakra, olova, kadmijuma, cinka, arsenika i žive, i ostatke oblika krečnjaka i oksida aluminijuma. S obzirom na niske vrednosti pH postoje mogućnosti pojave i fluorida. Otpadne vode iz procesa elektrolitičke rafinacije bakra u talogu mogu sadržati zlato i srebro.

U procesu topljenja bakronosne sirovine „proizvodi” se, u principu, manje od tri tone čvrstog otpada po toni proizvedenog bakra.

Tehnološka šema pirometalurške proizvodnje bakra u RTB-Bor grupi sastoji se od operacija: prženja, topljenja, konvertovanja i plamene rafinacije.

Šarža (koncentrat bakra i topitelji - kvarc i krečnjak) uz pomoć vazduha se prži u fluosolid Dorr-Oliver reaktoru, a proizvedeni prženac se topi u plamenoj peći i proizvod bakrenac ide na dalju preradu u Peirce Smith konvertor. Šljaka iz plamene peći odlaže se na deponiji.

Blister bakar iz konvertora se prerađuje u anodnim pećima, uz pomoć vazduha, goriva i reducenta (bukovog drveta) do anodnog bakra (99,5% čistog bakra). Anodni bakar, nakon livenja u posebnom obliku anode, ide na elektrolitičku rafinaciju gde se dobija katodni bakar čistoće 99,99% Cu, kao finalni proizvod metalurgije bakra u RTB-Boru.

Potrošnja energenata u proizvodnji katodnog bakra u poslovnoj 2008. godini ostvarena je, svedena na ekvivalentni ugalj (eu), u iznosu od 1,853 t<sub>eu</sub>/t<sub>k.b.</sub> ili 54,308 GJ/t<sub>k.b.</sub>, tabela 1.

**Tabela 1. Potrošnja energije u proizvodnji katodnog bakra u 2008. godini**

Energent	Toponica bakra	Elektrolitička rafinacija bakra	Proizvodnja sumporne kiseline	Ukupna količina utrošene energije, t <sub>eu</sub> /t <sub>kb</sub>	Učešće utrošene energije, %
1. Električna energija, kWh/t <sub>kb</sub>	1.831,112	500,644	431,310	0,674	36,37
2. Ugalj u plamenoj peći, t/t <sub>kb</sub>	0,988			0,981	52,94
3. Mazut, kg/t <sub>kb</sub>	39,080			0,053	2,86
4. Para t/t <sub>kb</sub>	0,596	0,377		0,091	5,02
5. Drvo za redukciju, m <sup>3</sup> /t <sub>kb</sub>	0,062			0,021	1,14
6. Lož ulje, dm <sup>3</sup> /t <sub>kb</sub>	7,760		17,339	0,031	1,67
<b>UKUPNO:</b>					
7. Ekvivalentni ugalj, t <sub>eu</sub> /t <sub>kb</sub>	1,569	0,157	0,127	1,853	100,00
Učešće, %	84,67	8,48	6,85	100,00	100,00

Indeksi: k.b.- katodni bakar;

eu- ekvivalentni ugalj (donje toplotne moći 29.308 kJ/kg)

Nepobitna je činjenica da je pristup energiji po prihvatljivim cenama ključan preduslov za privredni i socijalni razvoj društva. No, s druge strane, proizvodnja energije i njeno korišćenje značajno utiče na okolinu, uzrokujući zagađenja lokalnog i regionalnog karaktera (smog, čadi, poletine, kisele kiše i slično), ali i globalne probleme po put globalnog zagrevanja i rezultujućih klimatskih promena.

Naime, energija se još uvek u većini slučajeva proizvodi iz fosilnih goriva (ugalj, nafta, naftnih derivati i prirodni gas). Njihovim sagorevanjem u atmosferu se ispuštaju razni polutanti poput sumpor dioksid, azotni oksidi, čestice i ugljen dioksid. Gasovi  $\text{SO}_2$  i azotni oksidi, osim njihovog potencijalnog delovanja na zdravlje, poznati su kao „kiseli“ gasovi jer njihovom transformacijom prilikom transporta na daljinu nastaju kiseli sastojci koji se talože iz atmosfere u obliku vlažnog („kisele“ kiše) i suvog taloženja. Osim zakiseljivanja, azotni oksidi sudeluju u eutrofikaciji i stvaranju štetnog prizemnog ozona. S druge strane, ugljen dioksid je najznačajniji uzročnik globalnog zagrevanja.

Stoga, valja imati na umu da se energija uvek proizvodi kako bi se zadovoljila potrošnja. Proizvodnja je uzrokovana potrošnjom, pa nepažljiva, neefikasna potrošnja uzrokuje nepotrebitno veliku proizvodnju, a time i nepotrebitno veliki negativan uticaj na okolinu. Poboljšana efikasnost upotrebe energije rezultiraće njenom smanjenom potrošnjom, što vodi i smanjenju proizvodnje energije. Može se reći da svaki kWh energije koji ne potrošimo znači određenu količinu onečišćenih gasova koji nisu ispušteni u atmosferu. Prema tome, efikasnijem korišćenju energije postiže se kvalitetnija životna sredina, te se pridonosi globalnoj borbi za suzbijanje klimatskih promena.

## POLAZNA OSNOVA I ANALIZA EKVIVALENATA $\text{CO}_2$ I $\text{SO}_2$ U PROIZVODNJI BAKRA

Izvori pojave zagađivača u procesu proizvodnje bakra su energenti, koncentrat bakra i topitelji. Tehnička i elementarna analiza enerenata prikazana je u tabeli 2. Kao izvori zagađivača ovde su uzeti i ekvivalenti  $\text{SO}_2$  i  $\text{CO}_2$  za utrošenu električnu energiju sa mreže Elektroprivrede Srbije (EPS) i deo toplotne energije proizvedene u parnim kotlovima Termoelektrane (koja je proizvedena sagorevanjem uglja, ali bez isporučene pare iz utilizacionog parnog kotla Toponice bakra).

**Tabela 2.** Tehnička i elementarna analiza goriva korišćenih u proizvodnji bakra

PARAMETAR	UGALJ	MAZUT	DRVO	LOŽ ULJE	UGALJ U TE -BOR	UGALJ U TE EPS-a
<b>TEHNICKA ANALIZA GORIVA SA DOSTAVNOM VLAGOM</b>						
Vrsta goriva	kameni		bukovina		mrki	lignit
Utrošena količina goriva, t	33.334	1.319	2.087 m <sup>3</sup>	921 m <sup>3</sup>	7.994	34.328.794
Vлага, %	5,00	1,0	12	0,55	22,71	58,70
Pepeo, %	8,48	1,0	1,1	0,70	13,18	5,24
Sumpor (ukupan), %	0,73				2,46	0,58
Sumpor u pepelu, %	0,15				0,47	0,29
Sumpor (sagoriv), %	0,57	3,00	-	0,05	1,99	0,29
Donja toplotna moć, kJ/kg	28.924	41.715	18.261	43.439	15.590	8.290
Zapreminska masa, t/m <sup>3</sup>	1,290		0,500	0,84	1,21	
<b>ELEMENTARNA ANALIZA GORIVA</b>						
Ugljenik (ukupni) C, %	72,06	84,00	50,46	86,10	39,73	24,78
Vodonik H, %	5,01	10,70	6,01	11,80	3,16	2,30
Sumpor (sagoriv) S, %	0,57	3,00	-	0,05	1,99	0,29
Kiseonik O, %	7,38	0,0	42,25	-	9,00	9,75
Azot, N, %	1,5	0,3	0,16	0,8	0,84	1,30

**Bilans potrošnje energenata u proizvodnji bakra**

**1. Ugalj za loženje plamene peći.** U posmatranom periodu utrošena je količina kamenog uglja (slika 2) od 33.334 t ili 0,83 t/t<sub>ab</sub> (indeks: ab-označava da se radi o masi anodnog bakra, koji se proizvodi u Topionici). Njegovim sagorevanjem se proizvodi 1,3454 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/kg uglja, 0,00399 m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>/kg uglja i 5,949 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/kg uglja.

**Sl. 2.** Ugalj koji se koristi za loženje plamene peći

**2. Mazut.** Za loženje anodnih peći utrošena je količina mazuta 1.319 t ili 0,033 t/t<sub>ab</sub>. Sagorevanjem 1 kg mazuta dobijeni su: ugljen dioksid 1,606 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/kg, sumpor dioksid 0,021 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/kg i azot 8,235 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/kg mazuta.

**3. Drvo-bukovina,** koje se koristi za redukciju u anodnim pećima, utrošena količina iznosi 2.087 m<sup>3</sup> ili 0,052 m<sup>3</sup>/t<sub>ab</sub>. Njegovim sagorevanjem dobijeni su gasoviti produkti: 0,9421 m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub>/kg i 3,597 m<sup>3</sup><sub>n</sub> /kgN<sub>2</sub>/kg drveta.

**4. Lož ulje.** Potrošnja lož ulja ili drugog, u anodnim pećima i Fabrici sumporne kiseline, je ostvarena u iznosu od 921,206 m<sup>3</sup> ili 0,023 m<sup>3</sup>/t<sub>ab</sub> i sagorevanjem su proizvedeni gasoviti produkti: 1,607 m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub>/kg, 0,00035 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/kg i 8,541 m<sup>3</sup><sub>n</sub> N<sub>2</sub>/kg lož ulja.

**5. Ugaj za proizvodnju toplotne u Termoelektrani.** Proizvodnja toplotne energije u Termoelektrani Bor ostvaruje se korišćenjem toplotne energije pare, proizvedene u utilizacionom parnom kotlu u Topionici, i sagorevanjem uglja u parnim kotlovima Termoelektrane. U ovom delu uzima se u obzir samo proizvedena para u parnim kotlovima Termoelektrane, jer para iz Topionice, kao energetik, je uzeta ugljem kojim se loži plamena peć u Topionici, pa tako ona ne utiče na dodatno zagadživanje životne sredine. Za proizvodnju toplotne u Termoelektrani u količini od 27.181 MW<sub>h</sub> utrošena je količina uglja (donje toplotne moći 15.590 kJ/kg) od 9.994 tona, 0,234 t uglja/t<sub>kb</sub> ili 805,343 kW<sub>th</sub>/t<sub>kb</sub>. Sagorevanjem uglja u parnim kotlovima Termoelektrane proizvedeni su gasoviti produkti: 0,742 m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub>/kg, 0,0139 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/kg i 4,259 m<sup>3</sup><sub>n</sub> N<sub>2</sub>/kg uglja.

Ekvivalenti CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub> po jedinici proizvedene toplotne, sagorevanjem uglja u Termoelektrani, iznose: 431,429 kgCO<sub>2</sub>/MW<sub>h</sub> i 11,989 kg SO<sub>2</sub>/MW<sub>h</sub>, a ove veličine, svedene na tonu proizvedenog katodnog bakra (t<sub>kb</sub>), su: 347,448 kg CO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub> i 9,655 kg SO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>.

**6. Električna energija.** Kombinat bakra se snabdeva električnom energijom iz sistema Elektroprivrede Srbije (EPS), a deo je proizведен u Termoelektrani i mini hidro-elektrani na Borskem jezeru. Za potrebe ovih istraživanja uzima se da električna energija „zagadjuje“ životnu sredinu na mestu proizvodnje sa ekvivalentima gasova dobijenih sagorevanjem uglja u termoelektranama EPS-a. Sagorevanjem uglja u termoelektranama EPS-a (kvaliteta prema tabeli 2) oslobođaju se gasoviti produkti: 0,4626 m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub>/kg, 0,00203 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/kg i 1,9862 m<sup>3</sup><sub>n</sub> N<sub>2</sub>/kg uglja. U EPS-u u 2008. godini proizvedena je električna energija 35.039 GWh (i to: u termoelektranama 24.661 GWh<sub>TE</sub> i hidro-elekteranama 10.011 GWh<sub>HE</sub>) u isto vreme utrošena je količina ugljeva 35.472.474 tona. U termoelektranama EPS-a ostvarena je specifična emisija gasovitih produkata: 1,314 m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub>/kWh<sub>TE</sub>, 0,00594 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/kWh<sub>TE</sub> i 3,5715

$m^3_n N_2/kWh_{TE}$ . S obzirom da se RTB Bor snabdeva električnom energijom iz jedinstvenog sistema EPS-a, odnos utrošene električne energije u RTB-u Bor je uzet da je istovetan sa odnosom proizvedene električne energije, to jest  $EE_{TE}/EE_{HE}=2,463$ , specifična potrošnja uglja  $695,215 kWh_{TE}/t_{uglja}$ , ili  $11.921 \text{ kJ/kWh}_{TE}$ , tako stepen efikasnosti termoelektrana EPS-a, kao celine, iznosi  $\eta_{TE}=0,3020$ .

S druge strane, emisija gasova koji izazivaju efekat „staklene“ bašte i „kisele“ kiše sveden na jedinicu električne energije za sistem EPS-a iznosi:  $0,925 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{TE+HE}$ ,  $0,00418 \text{ kg SO}_2/\text{kWh}_{TE+HE}$  i  $2,5137 \text{ kg N}_2/\text{kWh}_{TE+HE}$ .

Proizvodi sagorevanja goriva prikazani su u tabeli 3.

**Tabela 3.** *Produkti sagorevanja goriva u proizvodnji bakra*

Kompo-nenta	Ugalj u Topionici	Mazut	Drvo	Lož ulje	Ugalj u TE Bor	UKUPNO 2+3+4+5+6	Ugalj EPS-a
1	2	3	4	5	6	7	8
$CO_2, m^3_n$	44.858.345,15	2068561,32	983081,35	1243894,40	5.931.548,00	55.085.430,22	15.881.962,510
$N_2, m^3_n$	198.303.966	10.861.965	3.753.469,5	7.868.020,45	34.046.446,0	254.833.866,6	68.183.850.640
$SO_2, m^3_n$	133.002,66	27.699		270,83	111.356,42	272.328,910	69.687.451,82
$CO_2, t$	88.684.948	4.089.546	1.943.552	2.455.179	11.726.670	108.903.895	31.395.748,71
$N_2, t$	247.971,177	13.582.453	4.693.563	9.838.645	42.573,719	318.659,557	85.261.177,87
$SO_2, t$	389,206	81,056		0,792	325,862	796,916	203.926,390
$CO_2, n /kg_{goriva}$	1,3454	1,60562	0,9421	1,607	0,742		0,4626
$SO_2, n /kg_{goriva}$	0,00399	0,0210		0,00035	0,01393		0,00203
$N_2, m^3_n /kg_{goriva}$	5,949	8,235	3,597	8,541	4,259		1,9862

*Linija bakra u 2008. godini je utrošila električnu energiju  $94.869.732 \text{ kWh}$*

#### **Bilans sumpora u proizvodnji bakra**

Bilans sumpora u pirometalurškoj proizvodnji bakra (topionica, elektrolitička rafinacija bakra i proizvodnja sumporne kiseline, tabela 4) sastoji se od: goriva i koncentrata bakra na ulazu, dok se procesni prostor napušta sa gasovitim produktima kao što su poletina, šljaka plamene peći, i slično.

Sumpor koji se unosi u proces koncentratom bakra ( $0,3329 \text{ t}_S/t_{sk}$ ) i gorivom ( $0,001172 \text{ t}_S/t_{sk}$ ) odlazi iz procesa sa: poletinom  $0,000364 \text{ t}_S/t_{sk}$  (0,11%), gasovima  $0,328757 \text{ t}_S/t_{sk}$  (98,41%), sa šljakom plamene peći  $0,00197 \text{ t}_S/t_{sk}$  (0,59%) i ostalo je 0,89%. U poslovnoj 2008. godini u atmosferu je ispušten sa gasovitim produktima pirometalurške preoizvodnje bakra  $0,209807 \text{ t}_S/t_{sk}$  ili

1.216,893 kg<sub>S</sub>/t<sub>kb</sub>, što kao SO<sub>2</sub> gas iznosi 2,966 t<sub>SO<sub>2</sub></sub>/t<sub>kb</sub> (1.013,672 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>).

Iskorišćenje sumpora sa proizvedenom sumpornom kiselinom iznosi 35,60%, a samo iskorišćenje sumpora iz koncentrata je 35,73%. U slučaju da se sav SO<sub>2</sub> iz gasovitih produkata prženja i konvertovanja iskoristi za proizvodnju sumporne kiseline, iskorišćenje sumpora iz koncentrata bakra (*kolona 1 ulaz, tabela 4*) tada iznosi 93,84%, a ako se uzme sumpor iz svih gasova topionice (1,3,6 i 8 izlaz, *tabela 4*) i iskoristi, stepen iskorišćenja sumpora iz koncentrata je tada 98,755%.

Količina SO<sub>2</sub>, koja se emituje (oslobađa) u proizvodnji bakra sa učešćem ekvivalenta sumpor dioksida električne energije, iznosi:

1. Od sagorevanja goriva:

$$0,7 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{kg}_S \cdot 0,001172 \text{ t}_S/\text{t}_{\text{sk}} \cdot 10^3 \text{ kg/t} = 0,820 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{sk}} = 4,759 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}}, \quad 0,35\%$$

2. Od električne energije:

$$1,991 \text{ kg}_{\text{SO}_2}/\text{t}_{\text{sk}} / 2,9263 \text{ kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3_n \text{ SO}_2 = 0,680 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{sk}} = 3,944 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}}, \quad 0,29\%$$

3. Od hemijskih reakcija:

$$0,3329 \cdot 10^3 \text{ kg}_S/\text{t}_{\text{sk}} \cdot 0,70 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{kg}_S = 233,030 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{sk}} = 1351,588 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}}, \quad 99,12\%$$

4. Od uglja u TE Bor

$$\text{kg}_S/\text{t}_{\text{sk}} \cdot 0,70 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{kg}_S = 0,569 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{sk}} = 3,300 \text{ m}^3_n \text{ SO}_2/\text{t}_{\text{kb}} \quad 0,24\%$$

---

**UKUPNO (1+2+3+4):** 235,099 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/t<sub>sk</sub> = 1363,591 m<sup>3</sup><sub>n</sub> SO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub> 00,00%

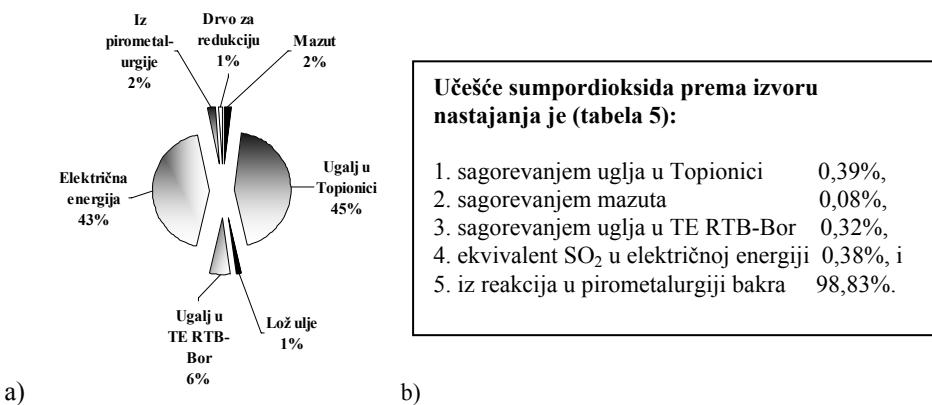
**Tabela 4. Bilans sumpora u pirometalurgiji bakra u 2008. godini**

<b>Element</b>	<b>Količina i-tog elementa, t/a</b>	<b>Količina i-tog elementa, t/t<sub>kb</sub></b>	<b>Količina sumpora i-tog elementa, t<sub>sumpora</sub>/t<sub>kb</sub></b>
<b>ULAZ:</b>			
1. Suvi koncentrat	195.725	5,799087	1,930516
2. Ugalj za loženje plamene peći	33.334	0,987645	0,005619
3. Mazut	1.319	0,039080	0,001166
4. Lož ulje	773,813	0,022927	0,000012
<b>Σ (1-4)</b>		<b>6,848739</b>	<b>1,937313</b>
<b>IZLAZ:</b>			
1. Gasovi prženja (merno mesto) MM8	41.027 m <sup>3</sup> /h		1,023829
2. Poletina sa gasovima prženja	0,2395g/m <sup>3</sup>	0,002551	0,000255
3. Gasovi topljenja MM6	55.307 m <sup>3</sup> /h		0,088160
4. Poletina sa gasovima topljenja MM6	1,2854 g/m <sup>3</sup>	0,018560	0,000818
5. Šljaka plamene peći	175.600	5,202809	0,011426
6. Gasovi konvertovanja MM13	115.674 m <sup>3</sup> /h		0,787933
7. Poletina sa gasovima konvertora	0,3691 g/m <sup>3</sup>	0,010266	0,001038
8. Anodni bakar	40.161	1,190102	0,000238
9. Gasovi plamene rafinacije	2.413 m <sup>3</sup> /h		0,006798
10. Ostalo			0,016818
<b>Σ (1-10)</b>		<b>6,848739</b>	<b>1,937313</b>
11. Sumporna kiselina, proizvod	70.848	2,099138	0,689801
12. Katodni bakar	33.751	1,0	≤ 0,000015
13. Izlaz S sa gasovima (1+3+6+9)	63.345,964	1,876862	1,906720
14. Izlaz S sa poletinom (2+4+7)	71,244	0,002111	0,002111
15. Imisija S u atmosferu sa gasovima	41.064,475	1,216689	1,216881
16. Imisija S u atmosferu kao SO <sub>2</sub>	100.099,050	2,965809	2,966 t <sub>SO<sub>2</sub></sub> /t <sub>kb</sub>

## DISKUSIJA REZULTATA

U predhodnom tekstu, svi eksplisitni parametri su prikazani po jedinici proizvoda (po toni anodnog bakra, toni katodnog bakra ili po toni prerađenog koncentrata bakra). Za potpuno sagledavanje operativnije je da se najvažniji parametri prikažu i u nominalnom iznosu. Za ostvareni nivo proizvodnje bakra, u toku navedene godine, emitovana je količina ugljen dioksida, sumpor dioksida, azota i poletine (tabela 5):

- ugljendioksida:  $4.580 \text{ t}_{CO_2}$  iz pirometalurških reakcija,  $108.894 \text{ t}_{CO_2}$  od sagorevanja goriva u Topionici i TE,  $86.262 \text{ t}_{CO_2}$  kao ekvivalent  $CO_2$  u proizvodnji električne energije u EPS-u, a sve skupa  $199.736 \text{ t}_{CO_2}$ ;



**Sl. 3. Učešće u proizvodnji bakra po izvoru nastajanja:**

a) ugljen dioksida, b) sumpor dioksida

- sumpor dioksida:  $100.105 \text{ t}_{SO_2}$  iz pirometalurških reakcija,  $799 \text{ t}_{SO_2}$  od sagorevanja goriva u Topionici i TE i kao ekvivalent  $SO_2$  u proizvodnji električne energije u EPS-u, a za njenu potrošnju u proizvodnji bakra,  $396 \text{ t}_{SO_2}$ , što je ukupno  $101.300 \text{ t}_{SO_2}$ .
- azota, kao komponenta produkta sagorevanja goriva u Topionici, Fabrici sumporne kiseline i Termoelektrane,  $318.659,6 \text{ t}_{N_2}$ , kao ekvivalent  $N_2$  u proizvodnji električne energije u EPS-u, a za potrošnju u proizvodnji bakra,  $238 \text{ t}_{N_2}$ , što je ukupno  $318.898 \text{ t}_{N_2}$ .

- poletina sa gasovima: prženja 48 t, plamene peći 459 t i konvertovanja oko 40 t, što je ukupno c-ca 547 t u posmatranoj godini. Veća količina poletine, koja se zadržava u Fabrici sumporne kiseline, je u obliku taloga.

**Tabela 5. Bilans gasova "staklene" bašte i "kisele" kiše u proizvodnji katodnog bakra**

	Specifična potrošnja po t <sub>kb</sub>	Emisija CO <sub>2</sub> kg CO <sub>2</sub> /t <sub>kb</sub>	Emisija SO <sub>2</sub> kg SO <sub>2</sub> /t <sub>kb</sub>	Emisija N <sub>2</sub> , kg N <sub>2</sub> /t <sub>kb</sub>
1. Ugalj u Topionici, t	0,988 t/t <sub>kb</sub>	2.627,638	11,532	7.347,114
2. Mazut, kg	39,080 kg/t <sub>kb</sub>	121,169	2,402	402,433
3. Lož ulje, dm <sup>3</sup>	25,099 dm <sup>3</sup> /t <sub>kb</sub>	72,744	0,023	291,508
4. Drvo za redukciju, m <sup>3</sup>	0,062 m <sup>3</sup> /t <sub>kb</sub>	57,585	-	139,065
5. Ugalj u TE, t	0,237 t/t <sub>kb</sub>	347,448	9,655	1.261,413
<b>SVEGA 1-5:</b>		<b>3.226,415</b>	<b>23,612</b>	<b>9.441,819</b>
6. Električna energija, kWh	2.763,066 kWh/t <sub>kb</sub>	2.555,836	11,550	6.945,519
<b>UKUPNO 1-6:</b>		<b>5.782,251</b>	<b>35,162</b>	<b>16.387,338</b>
Ekvivalentni ugalj, t <sub>eu</sub>	1,853 t <sub>eu</sub> /t <sub>kb</sub>	3.120,481 kg CO <sub>2</sub> /t <sub>eu</sub>	18,976 kg SO <sub>2</sub> /t <sub>eu</sub>	8.843,679 kg N <sub>2</sub> /t <sub>eu</sub>
7. Iz pirometalurgije		135,697	2.966,308	-
<b>SVEGA 1-7</b>		<b>5.917,948</b>	<b>3.001,470</b>	<b>16.387,338</b>

Imisija štetnih supstanci u životnoj sredini, svedenih na jedinici mase proizvedenog katodnog bakra u 2008. godini, iznosi: ugljen dioksida 5,918 t CO<sub>2</sub> /t<sub>kb</sub>, sumpordioksida 3,001 t SO<sub>2</sub> /t<sub>kb</sub>, azota 16,387 t N<sub>2</sub> /t<sub>kb</sub> i poletine 0,016 t/t<sub>kb</sub>. Imisija je na širokom prostoru i zahvata prostor širi od okoline Bora.

Emisija CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub> po jedinici ekvivalentnog uglja, kao parametar potrošnje energije u proizvodnji bakra, ostvarena je u iznosu od: 3.120,481 kg CO<sub>2</sub> /t<sub>eu</sub>, 18,976 kg SO<sub>2</sub> /t<sub>eu</sub> i 8.843,679 kg N<sub>2</sub> /t<sub>eu</sub>.

## ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati originalnih istraživanja vezanih za elemenate u proizvodnji bakra koji utiču na kvalitet i kvantitet životne sredine. Posebna pažnja je posvećena elementima koji izazivaju moguće efekte „staklene“ bašte i „kisele“ kiše ugljen dioksidu, sumpor dioksidu i poletini. Usled nedostatka merenja i analiza, učešće efekata proizvodnje bakra na stepen globalnog zagrevanja i pojave „kisele“ kiše nije razmatran. Zadatak ostaje za neku drugu priliku. Za procenu emitentata i imitenata korišćeni su metodi stehiometrije, merenja veličina i poštovanje Zakona o održanju masa i energije.

Za posmatranoj poslovnu 2008. godinu, određeni su ekvivalenti emisije iz metalurških peći: sumpor dioksida 1.363,594 m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>, ugljen dioksida

2.993,424 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub> i azota 7.556,419 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub> ili ukupno: 46.022.425,19 m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>/a, 101.030.535,6 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/a, 255.035.390,4 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/a i 547 tona poletine (letećeg praha).

Imisija zagadivača, u istom periodu, iznosi sumpor dioksida 1.025,583 m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>, ugljen dioksida 2.993,424 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>, azota 7.556,419 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub> i poletine 16,207 kg/t<sub>kb</sub> ili ukupna količina u posmatranoj godini: 34.614.274,41 m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, 101.030.535,6 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, 255.035.390,4 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> i poletina 547 t. Na osnovu ovoga iskorišćenje sumpora, proizvodnjom sumporne kiseline, dostigao je vrednost 35,60%, a mogući bi bio 98,75%.

Izgradnjom „nove“ topionice bakra, koja je trenutno aktuelna u Boru, po autogenom tehnološkom postupku<sup>2</sup> treba očekivati eliminisanje imisije sumpor dioksida i poletine, a s njom i olova, cinka, žive, kadmijuma, arsena i ostalih komponenata, i smanjenje količine imisije ugljen dioksida i azota. Ovim će biti smanjeno učešće procesa proizvodnje bakra na efekte globalnog zagrevanja kao što su efekat „staklene“ bašte i pojave „kiselih“ kiša u okolini Bora i šire, kao i eliminisanje direktnih šteta od gasova topionice na poljoprivredu i eko sistem u okolini. To će biti ekološka revolucija, zar ne?!

## LITERATURA

- [1] Mitovski M., Mitovski A., Uticaj energetike na životnu sredinu Borske opštine, Zbornik radova sa naučno-stručnog skupa EkoIst '06, Ekološka Istina str. 174-178, Sokobanja, 2006.
- [2] Tehnički izveštaj decembar 2008., Tehnička priprema Topionice Bor, RTB-Bor, 2009.
- [3] Mitovski M., Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, 1988.
- [4] Dietrich G., Hemmer H., Umbau und Modernisierung der Kupferhütter Bor (Jugoslawien), Erzmetall Bd. 26 (1973) H. 3.
- [5] Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998 Toward Cleaner Production, ISBN 0-8213-3638-X, The World Bank Group Washington, D.C.
- [6] Ispitivanje parametara gasnih tokova u TIR-u u 2008. godini, Institut za rудarstvo i metalurgiju, Bor, 2009.

<sup>2</sup> Tehnologija topljenja u Outokumpu Flash Smelting Furnace, mada, sa tehničko-tehnološkog stanovišta i troškova proizvodnje bakra, provejava mišljenje stručne javnosti da je ipak najpovoljnija tehnologija topljenja koncentrata bakra "Oxygen injection smelting", gde su niža investiciona ulaganja za oko 37%, a troškovi proizvodnje za skoro 40% [10, 11, 12]. Takođe, druga naznačena tehnologija topljenja bakronosne šarže trenutno je u punom zamahu širenja u svetu.

- [7] Émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion d'énergie 1971-2004, Agence internationale © OCDE/AIE, 2006.
- [8] Bukarica V., Dović D., Borković Ž., Soldo V., Sušić V., Švaić S., Zanki V., Priručnik za energetske savjetnike, Program UN za razvoj (UNDP) u Hrvatskoj, Zagreb 2008.
- [9] Mitovski M., Energetska efikasnost pogona TIR-a u 2008. godini, RTB-Bor, TIR, Bor 2009.
- [10] Arthur P., Butler B., Edvards J., Fountain C., Hunt S., Tuppurainen J., The ISASMETTM Process-an example of successful industrial R&D, Yazawa Symposium, San Diego, 2003.
- [11] Požega E., Gomidželović L., Trujić V., Živković D., Analysis of advanced technologies in copper metallurgy, Copper 35 (2010) 1.
- [12] List RTB-a Bor "Kolektiv", RTV Bor.
- [13] European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, 2001-2006.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR4), WMO, UNEP, 1996-1997.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 669.041:669.3(045)=861

NAUČNI RAD

*Oblast: Energetska efikasnost*

### **TOPIONICE BAKRA SA PLAMENOM I ISASMELT PEĆI**

### **COPPER SMELTERS WITH REVERBATORY AND I SASMELT FURNACE**

Emina Požega<sup>1</sup>, Lidija Gomidželović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

#### **Izvod**

*Isasmelt peć omogućuje efektivnije korišćenje hemijske energije sadržane u koncentratu. Operativni podaci iz rudnika sa planine Isa ukazuju na to da je instalacijom Isasmelt peći za dobijanje bakra direktnim topljenjem koncentrata smanjena potrošnja energije za preko 80% u poređenju sa procesima koji koriste fluosolid reaktor i plamenu peć.*

*U ovom radu dano je poređenje topionica bakra koje koriste plamenu i Isasmelt peć. Za poređenje su korišćeni različiti dostupni tehnički i tehnološki parametri.*

**Ključne reči:** topljenje bakra, plamena peć, Isasmelt peć

#### **Abstract**

*The Isasmelt furnace enables effective use of the chemical energy contained in the concentrate. Operational data from Mount Isa Mines indicate that the installation of the Isasmelt furnace has reduced the amount of spend energy by over 80% compared with the process which use fluid bed roaster and reverberatory furnace.*

*In this paper are presented comparasion between copper smelters which use reverbatory and Isasmelt furnace. Parameters used for comparasion are different available technical and technological parameters of discussed processes.*

**Key words:** copper smelting, reverbatory furnace, Isasmelt furnace

## **UVOD**

Metalurgija bakra zavisi od količine rudnih rezervi, sadržaja bakra u zemljinoj kori, bakarnim rudama i koncentratima, nivoa proizvodnje i potrošnje bakra, kvaliteta dobijenih proizvoda, stepena iskorишћenja bakra i pratećih metala, a

---

<sup>1</sup> E-mail: emina.pozega@irmbor.co.rs

posebno sumpora, i zaštite atmosfere od sumpor-dioksida i drugih zagadivača, itd. [1]

Bakar može biti proizveden pirometalurškim ili hidrometalurškim postupkom. Hidrometalurški postupak se koristi samo za vrlo ograničenu količinu svetske proizvodnje bakra i obično je razmatran samo u vezi sa in-situ luženjem rude bakra. Sa ekološke tačke gledišta, ovakav pravac proizvodnje je pod znakom pitanja. Za proizvodnju bakra mogu se koristiti nekoliko različitih procesa. Tradicionalni postupak zasniva se na prženju, topljenju u plamenim pećima (ili električnim pećima za složenije rude), proizvodeći bakrenac (bakar-železo sulfid), konvertovanje za proizvodnju blister bakra, koji se dalje rafiniše do katodnog bakra. Ovakav način proizvodnje katodnog bakra zahteva velike količine energije po toni bakra:  $31.650 \cdot 10^6 - 42.200 \cdot 10^6$  MJ po toni katodnog bakra. Takođe, u peći se dobijaju gasovi sa niskim koncentracijama sumpor-dioksida ( $\text{SO}_2$ ) od kojih je proizvodnja sumporne kiseline ili drugih proizvoda manje efikasna. Koncentracija sumpor-dioksida u izlaznim gasovima u plamenoj peći je oko 0.5-1.5%, iz električne peći je oko 2-4% [1].

Topionice su pod velikim pritiskom da smanje emisiju štetnih gasova u atmosferu uz istovremeno zadržavanje niske cene proizvodnje metala. Zbog velike potrošnje električne energije i velikih ulaganja, smanjenje emisije štetnih gasova u atmosferu u plamenim pećima je onemogućeno prevelikim povećanjem troškova proizvodnje.

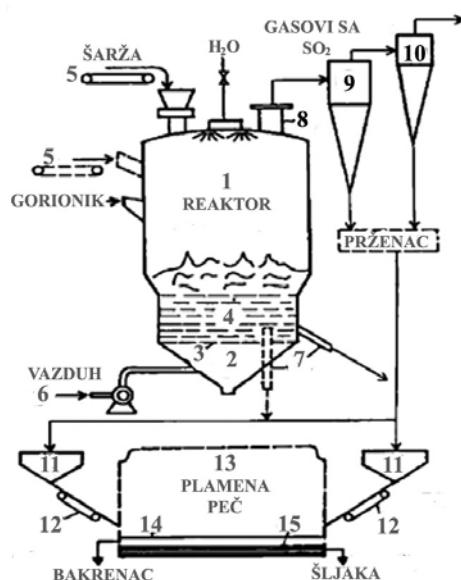
Isasmelt peć objedinjuje operacije prženja i topljenja i predstavlja moderan proces topljenja u rastopu za proizvodnju neželeznih metala. Primenljiva je za topljenje i konvertovanje rude bakra, koncentrata i sekundarnih sirovina, kao i za topljenje nikla i olova [2].

Isasmelt tehnologija, koja je vlasništvo MIM firme, razvijena je u saradnji sa Australijskom državnom naučno istraživačkom i industrijskom organizacijom (CSIRO). Početni razvoj Isasmelt tehnologije sproveden je u topionicama bakra i olova na planini Isa. "MIM" je australijska firma za rudarstvo i preradu minerala koja se bavi proizvodnjom bakra, olova, cinka, zlata, srebra i uglja u Argentini, Australiji, Nemačkoj i Velikoj Britaniji [3].

## **TOPIONICE BAKRA SA PLAMENOM I ISASMELT PEĆI**

### ***1. Plamena peć***

Ovaj tradicionalni način topljenja bakarnih koncentrata u rastopu još uvek se primenjuje u svetu. Da bi se dobio prženac sa niskim sadržajem sumpora koristi se fluosolid reaktor.



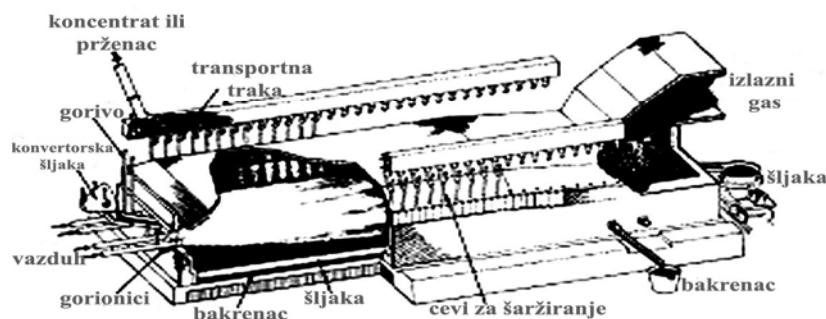
Slika 1. Šema fluo-solid reaktora:

1) reaktor, 2) vazdušna komora, 3) duvnička rešetka, 4) posteljica, 5) sistem za šaržiranje, 6) procesni vazduh, 7) preliv, 8) otvor za procesni gas, 9) primarni ciklon, 10) sekundarni ciklon, 11) bunker za poletinu, 12) šaržirani uređaj, 13) plamena peć, 14) šljaka, 15) bakrenac

Topitelj se u smeši sa pržencem dodaje pomoću cevi koja raspoređuje materijal duž unutrašnjih zidova pravougaone peći obložene vatrostalnim materijalom [3,4,5]. U prošlosti su gorionici za zagrevanje koristili raspršeni ugalj. Efikasnost topljenja plamene peći poboljšana je korišćenjem prirodnog gasa. Poboljšanje dizajna gorionika postalo je preteča nekoliko inovativnih načina topljenja. Rad plamene peći smatra se intenzivnim, gde je potrebna konstantna količina prženca, povremeno odvajanje šljake od bakrenca i ispuštanje bakrenca kroz otvor. Procenat silicijuma u šljaci utiče na viskozitet šljake i mehaničko zarobljavanje čestica bakrenca tokom raslojavanja bakrenca i šljake. Ostala rastvorena jedinjenja poreklom iz vatrostalne obloge peći i prženca, kao što su aluminijum i magnezijum oksid, takođe utiču na viskozitet šljake i stepen raslojavanja bakrenca. Kapacitet peći može se smanjiti nagomilavanjem magnetita na dnu peći i jedinjenja koja nastaju trošenjem vatrostalne obloge (na primer spineli).

U plamenoj peći (slika 2) se toplota nastala sagorevanjem goriva prenosi na rudu, dajući određenu ali ne i dovoljnu količinu toplote. Prva plamena peć za

topljenje bakra sagrađena je 1765. godine u Jorkširu u Engleskoj. Najveća plamena peć nalazi se u Anakondi rudniku u Montani. Peć je dugačka 119 m, a dnevni kapacitet peći je 300 t rude.

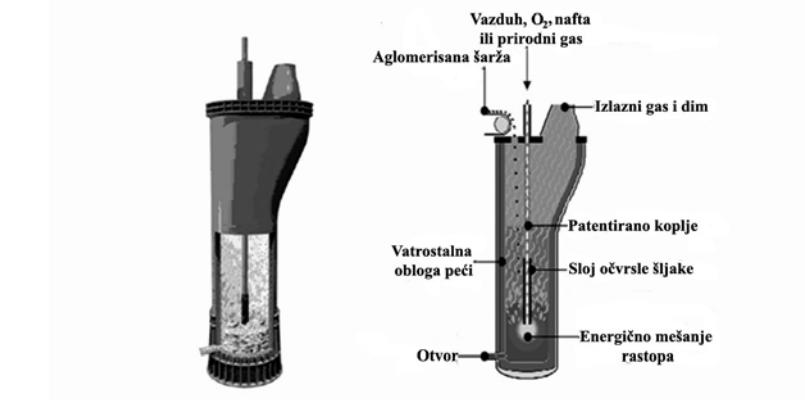


**Slika 2. Plamena peć**

## 2. Isasmelt peć

Isasmelt tehnologija okarakterisana je kao fleksibilan i jeftin proces dobijanja bakra u svetu. Razvoj procesa dokumentovan je brojnim objavljenim radovima [6-9]. Peći se mogu prilagoditi za preradu različitih vrsti šarže. Koriste patentirano "Sirosmelt" potopljeno koplje (slika 3) kroz koje se ubacuje mešavina vazduha obogaćenog kiseonikom i goriva (na primer prirodni gas, nafta, ugalj). U peć se konstantno dodaju ugalj, topitelji i peletizirana vlažna šarža. Rastop se ispušta u peć za raslojavanje gde se vrši odvajanje bakrenca i šljake. Visina koplja u rastopu se podešava tako da u izlaznim gasovima ima manje od 1% prašine u odnosu na šaržu. Izlazni gasovi prolaze kroz kotao i elektrostatički taložnik, gde nakon izdvajanja prašine iz gasa, on ide na proizvodnju sumporne kiseline.

Glavne osobine Isasmelt procesa su visoka koncentracija sumpor-dioksida u izlaznim gasovima, visoka produktivnost i smanjena potrošnja goriva [10-12]. Princip peći je sličan Ausmeltovoj peći, osim koplja koje je prekriveno slojem očvrsle šljake na vrhu, koji ga štiti od hemijske i fizičke abrazije. Proizvodi Isasmelt peći, bakrenac/bakar i šljaka ispuštaju se kroz otvor na dnu peći koji se hlađi vodom.

**Slika 3.** Isasmelt peć

Isasmelt tehnologija za dobijanje bakra uspešno se primenjuje u Australiji više od 20 godina. Danas je ova tehnologija postala vodeća tehnologija za dobijanje bakra koja se koristi u topionicama bakra širom sveta (Kina, Indija, Peru, Zambija, Belgija, SAD i Nemačka). Ovo je nova generacija tehnologije za preradu bakra koja nudi nisku potrošnju energije, niske kapitalne i operativne troškove, visoku produktivnost i minimalni uticaj na životnu sredinu [13].

## DISKUSIJA

U tabeli 1. dano je poređenje važnih tehničkih i tehnoloških parametara plamene i Isasmelt peći.

**Tabela 1.** Tehnički i tehnološki parametri plamene i Isasmelt peći

Topionice bakra	Plamena peć	Isasmelt peć
Temperatura	1200 – 1550°C*	max 1165°C [1]
Stepen obogaćenja vazduha	0 %*	0 – 70 % O <sub>2</sub> [1,16]
Gorivo	Nafta*, ugalj, prirodan gas [5]	Nafta ili prirodan gas [14]
Topitelj	SiO <sub>2</sub> *	SiO <sub>2</sub> , CaO [1]
Šarža	Prženac ili koncentrat*	Vlažna, peletizovana šarža ili koncentrat [15]
% Cu u koncentratu	13 – 45 [5]	18 – 30 [15]
Iskorišćenje bakra	95 – 99 % [5]	97 -98 % [1]
Cu u bakrenu	30 – 45 %*	55 - 60 % [1]
Cu u šljaci	1.5 – 2.6 % [5]	0.5 % [16], 0.8 % [15]
SO <sub>2</sub> u gasu	1 – 3 % [5]	7.5-11 % [16], max 27 % [15]

\*Plamena peć u topionici i rafinaciji bakra, RTB Bor, Srbija

Isasmelt peći mogu da koriste različite klase uglja, koksa, naftu, prirodan gas ili kombinaciju nekog od goriva. Mogu biti projektovane da za rad koriste jeftino gorivo, a takođe imaju mogućnost da se prilagode da koriste i druge vrste goriva, a da troškovi takve promene budu mali.

**Tabela 2. Potrošnja energije po toni koncentrata (GJ/t) kod plamene i Isasmelt peći**

	Plamena peć	Isasmelt peć
<b>Šarža (t)</b>	650000	1070000
<b>Potrošnja uglja (t)</b>	85000	6300
<b>Potrošnja prirodnog gasa (Nm<sup>3</sup>)</b>	0	6120000
<b>Potrošnja nafte (kL)</b>	2400	1980
<b>Potrošnja energije po toni koncentrata (GJ/t)</b>	4.12	0.47

Ukupna količina potrošene energije po toni koncentrata u topionici sa Isasmelt peći u 2001/2002 godini iznosila je 0.47% GJ/t koncentrata, što je 89% manje od potrošnje energije po toni koncentrata u reaktoru ili plamenoj peći u 1991-1992, tabela 2 [14]. Ovo smanjenje postignuto je prerađom šarže koja sadrži izvesnu količinu hemijske energije koju efektivnije mogu da koriste Isasmelt peći.

## ZAKLJUČAK

Stepen obogaćenja vazduha kiseonikom i sadržaj bakra u bakrenu su najbitniji parametri procesa. Oni imaju direktni uticaj na smanjenje troškova proizvodnje. Povećan sadržaj bakra u bakrenu omogućuje efikasnije i potpuno korišćenje toplote u procesu topljenja. Pored toga, povećan sadržaj SO<sub>2</sub> i njegov konstantan protok mnogo su pogodniji za proizvodnju sumporne kiseline.

Visok proizvodni kapacitet, kompaktna veličina peći, niska kapitalna ulaganja, ekološki prijateljska tehnologija, minimalna priprema šarže, visoka specifična stopa topljenja, fleksibilnost u gorivu i jednostavno rukovanje su neke od prednosti Isasmelt peći u odnosu na plamenu peć.

Polazeći od razlika između prihoda dobijenih prodajom bakra i rashoda za njegovu proizvodnju, može se odrediti ekonomski položaj svake topionice bakra u svetu, mogućnost njenog daljeg postojanja i opstanka. Iskorišćenje sumpora i vezivanje sumpor-dioksida, koji uslovljavaju zaštitu atmosfere, čine jedan od osnovnih kriterijuma uspešnosti procesa u metalurgiji bakra.

## LITERATURA

- [1] D. M. Vučurović, Č. N. Knežević: bakar Autogeni procesi topljenja u metalurgiji bakra, Institut za bakar, Bor, 2000.
- [2] M. Gao, P. Arthur, N. Aslin: Proven technologies from xstrata and their applications for copper smelting and refining in China, Hainan Conference, China, (2004), 1-11.
- [3] R. R Moskalyk, A. M. Alfantazi: Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow, Minerals Engineering 16 (2003) 893-919.
- [4] O. M. Krippner, S. Hähere, F. Schultmann, 1999. Report on best available techniques (BAT) in copper production. French – German Institute for Environmental Research, University of Karlsruhe, Germany, March, 167.
- [5] Ю. П. Купряков: Отражательная плавка медных концентратов, Металлургия, Москва, 1976.
- [6] D. Coulter, C. R. Fountain: The Isasmelt process for copper smelting, (paper presented at the non-ferrous smelting symposium, Port Pirie, South Australia, 17-21. septembar 1989), Aus. I. M : M., Melburne, (1989), 237-240.
- [7] C. R. Fountain, M. D. Coulter, J. S. Edwards: Minor element distribution in the copper Isasmelt process, Copper , 91, volume IV, Pegamon Press, New York, (1991), 359-373.
- [8] Player , C. R. Fountain, T. V. Nguyen, F. R. Jorgensen: Top-entry injection and the Isasmelt Technology, Poceedings of the Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting, The minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, (1992), 215-229.
- [9] L. Cribb, J. S. Edwards, C. R. Fountain, S. P. Matthew: Isasmelt technology for the smelting copper, 15th CMMI Congress, Johannesburg, vol.2., SAIMM, (1994), 99-103.
- [10] R. Player: Copper ISASMELT – Process Investigations, The Howard Worner International Syposium on Injection in Pyrometallurgy, July 1996, Melburne, The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, (1996), 439-446.
- [11] W. J. Errington, P. S. Arthur , C. R. Fountain: ISASMELT – Clean Efficient Smelting, GME' 99 GLOBAL Metals Environment Conference, Beijing, 24-27 May 1999, 164-172.

- [12] J. S. Edwards, C. R. Fountain, R. L. Morland: ISASMELT – extending the envelope, Proceedings of the Brimacombe Memorial Symposium, poster session proceedings, CIM, October 2000.
- [13] J. L. Bill, T. E. Briffa, A. S. Burrows, C. R. Fountain, D. Retallick , J. M. I. Tuppurainen, J. S. Edwards, P. Partington: ISASMELT – Mount Isa copper smelter progress update, in: Sulfide Smelting 2002, R. L. Stephens, H. Y. Sohn, (The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 2002), 181-193.
- [14] P. Arthur , J. Edwards: ISASMELTTM – A quiet revolution, EMC 2003, (2003), 1-20.
- [15] P. Arthur, P. Partington: ISA-SMELT – Not Just a Flash in the Pan, COBRE 2003, (2003), 1-14.
- [16] J. Ross, D. Vries: Mufulira smelter upgrade project, (2005), 1-22.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 669.3:681.51(045)=861

PREGLEDNI RAD

*Oblast: Metalurgija*

### **HSC CHEMISTRY: VIZUALIZACIJA PROCESA TOPLJENJA BAKRA**

### **HSC CHEMISTRY: VISUALISING COPPER SMELTING**

Emina Požega<sup>1</sup>, Lidija Gomidželović<sup>1</sup>, Vlastimir Trujić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

#### **Izvod**

*U oblasti tehnologije, matematičko modeliranje je već dalo impresivne rezultate i obećava mnogo više. Proces topljenja bakra modeliran je korišćenjem HSC Chemistry kompjuterskog paketa. Razmatrani su dobijeni rezultati ovog modeliranja i zaključeno je da HSC Chemistry kompjuterski termodinamički program olakšava sagledavanje ponašanja hemijskog sistema.*

**Ključne reči:** topljenje bakra, kompjuterska termodinamika, HSC Chemistry

#### **Abstract**

*In the area of technology, mathematical modeling has already delivered impressive results and promises a great deal more. The copper smelting process has been modeled using the HSC computational thermodynamics package. The derived results of this modeling are discussed and it is concluded that the computational thermodynamic program, HSC Chemistry enable simple way of looking at the behavior of chemical system.*

**Key words:** copper smelting, computational thermodynamics, HSC Chemistry

#### **UVOD**

U poslednjih nekoliko decenija mnogo pažnje je posvećeno matematičkom modeliranju metalurških procesa zbog razvoja hardvera i softvera koji omogućavaju daleko efikasnije manipulisanje jednačinama za modeliranje. Primena procesa simulacije dovodi do boljeg razumevanja složenih odnosa uslova poslovanja i karakteristika procesa, kapaciteta postrojenja, svojstva proizvoda i potrošnje energije.

---

<sup>1</sup> E-mail: emina.pozega@irmbor.co.rs

Modeliranje i simulacija su veoma uspešno primenjene u hemijskoj industriji i postali su bitan pristup za proces projektovanja i razvoja, optimizaciju rada fabrike/postrojenja, poslovne procene, pa čak i za svakodnevni rad preduzeća. Međutim, primena modelovanja i simulacije u metalurškoj industriji je ograničena, posebno u procesima ekstraktivne metalurgije bakra, zbog korišćenja kompleksne šarže. Osnovni faktori koji utiču na primenu su: složena i promenljiva šarža i neki neizvesni parametri rada.

Za metalurge su F\*A\*C\*T i HSC glavni alati za termodinamičku simulaciju i proračun [1]. HSC je ravnotežni simulacioni program, koji predviđa ravnotežnu reakciju višekomponenata na osnovu termodinamičkih principa, razvijen od strane Outokumpu kompanije. Outokumpu je ista kompanija koja je razvila topljenje bakra fleš tehnologijom. Ovaj softver je kreiran da im pomogne u procesu modeliranja, ali je sada dostupan i komercijalno. Program pri proračunu koristi bazu podataka koja sadrži entalpiju (**H**), entropiju (**S**) i toplotni kapacitet (**C**) za više od 17.000 hemijskih jedinjenja. Odatle i potiče naziv programa, „**HSC CHEMISTRY**”. Program omogućuje da se brzo i lako urade termodinamički proračuni. Zbog toga ima primenu kod razvoja novih hemijskih procesa i poboljšanja starih.

### **HSC CHEMISTRY: VIZUALIZACIJA PROCESA TOPLJENJA BAKRA**

Pirometalurgija je odličan primer za proučavanje termodinamičkih principa, zato što obuhvata višefazne, višekomponentne sisteme, gde je svaka glavna faza "mogućnost" i gde se zbog odvijanja na visokim temperaturama, proces približava hemijskoj ravnoteži [2,3,4]. Ovo dovodi do intezivnih reakcija sa veoma velikim protokom po jedinici zapremine, kao i sposobnost da se sa pouzdanosću predviđi ishod procesa, koristeći termodinamičke principe.

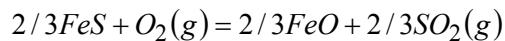
Simulaciono modeliranje je slikovit način istraživanja uticaja promenljivih (šarža, topitelj, vazduh, kiseonik) na proces topljenja. Termodinamika se može koristiti za predviđanje i/ili objašnjenje ponašanja štetnih elemenata u metalurgiji bakra. Korišćenje znanja o uslovima ravnoteže zahteva da se uzmu u obzir brojne pretpostavke. Najznačajnije je pretpostaviti da vladaju uslovi hemijske ravnoteže. U modernim procesima topljenja bakra, ova pretpostavka se može osnovano usvojiti zbog visoke radne temperature. Ulazni podaci uključuju sastav šarže, količinu ulaznog vazduha, temperaturu, ukupan pritisak i sve faze koje mogu biti u ravnoteži u sistemu.

### 1.1 Topljenje koncentrata

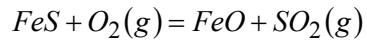
Bakar može biti proizveden pirometalurškim ili hidrometalurškim postupkom. Većina bakra u zemljinoj kori prisutna je u obliku sulfidnih minerala kao što su halkopirit ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornit ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), halkozin ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), pa je pirometalurška proizvodnja daleko obimnija.

Za termodynamiku i toplotu autogenih procesa, najveći značaj imaju minerali: pirit ( $\text{FeS}_2$ ), pirhotin ( $\text{FeS}$ ) i halkopirit ( $\text{CuFeS}_2$ ).

Prilikom zagrevanja halkopirita na temperaturu topljenja, dolazi do njegovog razlaganja na Cu<sub>2</sub>S i FeS, tako da su to dva sulfida čije ponašanje pri oksidaciji mora da se uzme u obzir. Ponašanje FeS sulfida dato je na slici 1., na dijagramu zavisnosti standardne Gibbsove slobodne energije od temperature za moguće reakcije. Jednačine su iskazane po molu O<sub>2</sub> (g), a podaci za standardnu Gibbsovu slobodnu energiju preuzeti su iz baze podataka HSC Chemistry 6.1 programa [5]. Evidentno je da oksidacija FeS do FeO ima najnegativniju standardnu Gibbsovu slobodnu energiju, tako da je reakcija koja će se prva odviti. Sumpor koji je oksidisao obrazuje sumpor dioksid, SO<sub>2</sub>(g). Reakcije koje dominiraju tokom topljenja su:

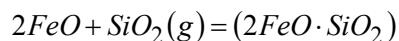


$$\Delta G^\circ = -231.805 \text{ kJ na } 1250^\circ\text{C} \dots \quad (1)$$

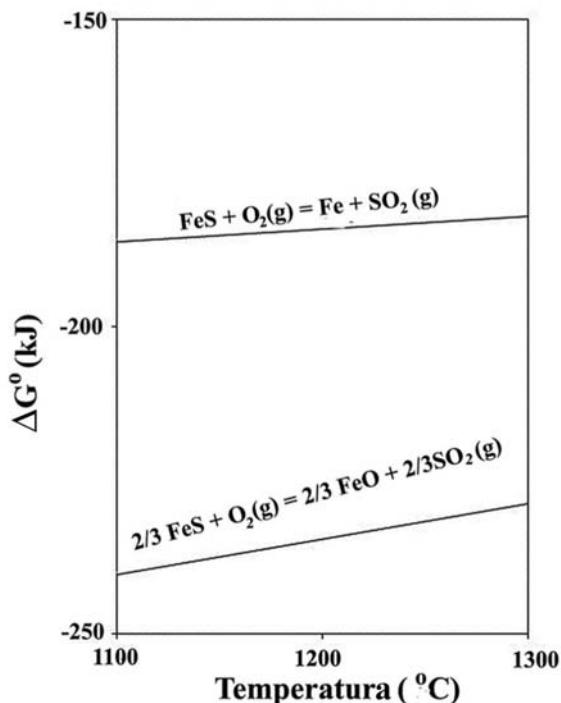


$$\Delta G^\circ = -185.074 \text{ kJ na } 1250 \text{ }^\circ\text{C} \dots \quad (2)$$

FeO je rastvorljiv u bakrencu, tako da je razdvajanje železa i bakra u različite faze nemoguće. Dodati  $\text{SiO}_2$  reaguje sa FeO, pri čemu nastaje šljaka koja se ne meša sa bakrencem, čime se omogućava razdvajanje železa od bakra.



$$\Delta G^\circ = -17.663 \text{ kJ na } 1250^\circ\text{C} \dots \quad (3)$$



**Slika 1.** Promena standardne Gibbsove slobodne energije u zavisnosti od temperature za reakcije pri topljenju bakra, prema [3]

## 1.2 Modeliranje topljenja bakra uz pomoć kompjutera

Matematički model je set algebarskih ili diferencijalnih jednačina koje mogu da se koriste za predstavljanje i predviđanje različitih procesa. Nasuprot teoremi, termin „model“ podrazumeva da korišćeni odnosi ne mogu biti potpuno tačni i da predviđanja izvedena iz njih mogu biti samo približna. Modeliranje topljenja bakra uz pomoć kompjutera kroz predstavljanje procesa ili operacija u kvantitativnom, matematičkom obliku, može igrati ključnu ulogu u kontroli, optimizaciji kao i u planiranju procesa.

Modeli obezbeđuju osnovu za razumevanje i razvijanje novih procesa, optimizaciju rada postrojenja/strategije i procene poslovne strategije firme, čime će se snažnije i efikasnije u krajnjoj liniji poboljšati profitabilnost po uslovima i u skladu sa propisima Vlade o zaštiti životne sredine.

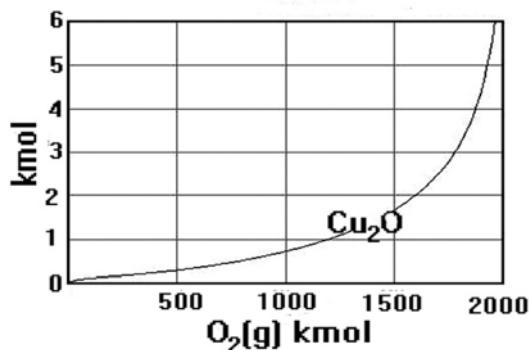
Za intenzifikaciju procesa topljenja koristi se vazduh, vazduh obogaćen kiseonikom, pregrejan vazduh, pregrejan vazduh obogaćen kiseonikom ili čist kiseonik. Takođe je hemijski i mineraloški sastav sulfidnih bakarnih koncentrata značajan.

U cilju sagledavanja jedne od mogućnosti HSC Chemistry programa, dat je prikaz topljenja halkopiritnog koncentrata.

Program od korisnika zahteva da unese sledeće podatke:

- sve faze u sistemu koje su u ravnoteži,
- sve okside i sulfide u svakoj od faza,
- količinu svih ulaznih supstanci,
- temperaturu i pritisak sistema.

U tabeli 1. su dati ulazni podaci za topljenje 1000 kmola halkopirita sa zadatim sadržajem bakra u bakrenцу od 60-65% (tež), sa čistim kiseonikom, na 1250°C i odgovarajućom količinom SiO<sub>2</sub>, da bi se dobila šljaka. Za ovaj primer, uzet je čisti kiseonik, da bi se pojednostavio proračun. Takođe su navedene vrednosti koeficijenata aktivnosti. Vrsta i količina mogućih faza u fizičko-hemijskoj interakciji, prikazani su takođe u tabeli 1.

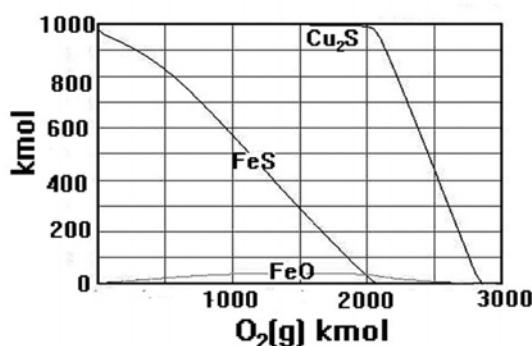


**Slika 2.** Količina bakra u šljaci pri oksidaciji 1000 kmola halkopirita sa čistim kiseonikom na 1250 °C

Na slici 2. prikazana je količina Cu<sub>2</sub>O u šljaci, odnosno količina bakra u šljaci pri procesu topljenja, [6], preračunato na osnovu [3].

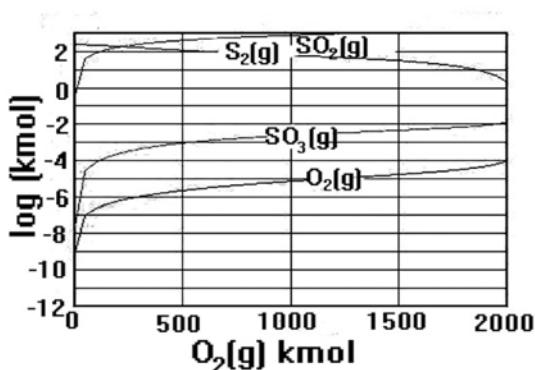
**Tabela 1.** Ulazni podaci za topljenje 1000 kmola halkopirita sa čistim kiseonikom na 1250°C

Faze	Ulazna količina kmol	Koeficijent aktivnosti
Gasna faza		
O <sub>2</sub> (g)	1	1.0
SO <sub>2</sub> (g)		1.0
S <sub>2</sub> (g)		1.0
SO <sub>3</sub> (g)		1.0
Sulfidna faza		
Cu <sub>2</sub> S		1.0
FeS		1.0
FeO		10.0
Oksidna faza		
FeO		0.7
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		5.0
FeS		15.0
SiO <sub>2</sub>	500	1.0
Cu <sub>2</sub> O		4.0
Čista supstanca	1000	1.0
CuFeS <sub>2</sub>		



**Slika 3.** Količina Cu<sub>2</sub>S, FeS i FeO u bakrenцу

Na slici 3. prikazana je promena količine Cu<sub>2</sub>S, FeS i FeO u bakrencu u funkciji kiseonika. Razmatrajući slike 2. i 3. zajedno, razjašnjava se veoma važan odnos, da kako sadržaj bakra u bakrencu raste (odnosno smanjuje se količina FeS u bakrencu), tako se smanjuje količina bakra koji prelazi u bakrenac (odnosno količina Cu<sub>2</sub>O u šljaci raste).



**Slika 4.** Parcijalni pritisak SO<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> i O<sub>2</sub> u gasnoj fazi pri oksidaciji 1000 kmola halkopirita sa čistim kiseonikom na 125 °C

Slika 4. prikazuje sastav gasne faze pri procesu oksidacije. Dominantan je SO<sub>2</sub> gas, ali postoji i značajan parcijalni pritisak S<sub>2</sub> gasa, koji smanjuje sadržaj bakra u bakrencu.

## ZAKLJUČAK

Simulacioni model omogućava optimizaciju procesa proizvodnje i smanjenje otpadnih materija, identifikuje merne greške i unapređuje razumevanje međuzavisnosti procesa.

Inteligentan sistem, koji se sastoji od informacionog sistema, procesa modeliranja i alata za donošenje poslovnih odluka, biće veoma koristan i moći će da pomogne menadžerima i inženjerima u fabriци pri optimizaciji rada i poslovanja.

Uz pomoć HSC Chemistry programa možemo predvideti efekat promene sastava šarže, količine ulaznog vazduha, temperature, ukupnog pritiska sistema. Veza između promenljivih se mnogo slikovitije vidi i razume kada se prikaže kroz izlaz računarskog termodinamičkog paketa.

## ZAHVALNICA

*Autori se zahvaljuju profesoru Dr Dragani Živković, dipl.ing.met. (Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru), na korisnim savetima i sugestijama pri izradi rada.*

## LITERATURA

- [1] X. J. Guo, Process modeling and intelligent system in copper smelter - The concept of future smart smelter, Ontario, Canada COPPER 2003 - COBRE 2003, Santiago, Chile, November 30 - December 3, 2003, str. 5.
- [2] <http://www.chemeca2007.com/abstract/169.htm>
- [3] T. S. Kho, D. R. Swinbourne, privatna komunikacija
- [4] E. Požega, L. Gomidželović, V. Trujić, D. Živković, Analiza savremenih tehnologija u metalurgiji bakra, Bakar, 35 (2010) 1, str. 15-24.
- [5] A. Roine, "HSC Chemistry® 6.0 user's guide ", str. 61.
- [6] Ž. Živković, N. Mitevska, I. Mihajlović, Đ. Nikolić: The influence of the silicate slag composition on copper losses during smelting of the sulfide concentrates, J. Min.and Metal. Section B: Metallurgy, 45 (1) B (2009) pp. 23-34.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 622.7:666.952(045)=861

### **STRUČNI RAD**

*Oblast: Priprema mineralnih sirovina*

### **ISPITIVANJE UTICAJNIH FAKTORA NA STABILNOST SUSPENZIJE TOPIONIČKE ŠLJAKE**

### **INVESTIGATION OF INFLUENCE FACTORS ON SUSPENSION STABILITY OF THE SMELTING SLAG**

Daniela Urošević<sup>1</sup>, Zoran S. Marković<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut za rударство и металургију у Бору,

<sup>2</sup>Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

### **Izvod**

*U radu su prikazana eksperimentalna istraživanja koja su imala za cilj utvrđivanje stabilnosti suspenzije, formirane od topioničke šljake. Ispitivan je uticaj sledećih parametara na stabilnost suspenzije šljake: finoća mlevenja, odnos čvrsto:tečno i pH vrednosti pulpe. Stabilnost suspenzije je ispitivana merenjem brzine sedimentacije, odnosno, očitavanjem visine formiranja taloga na dno menzure u određenim vremenskim intervalima, za različite finoće mlevenja, odnosa čvrsto:tečno i pH vrednosti pulpe. Ispitivanje je rađeno u cilju dobijanja maksimalne stabilnosti suspenzije šljake. Rezultati su pokazali da se sa porastom sadržaja klase -0,075mm u formiranoj suspenziji, povećava stabilnost suspenzije. Takođe, utvrđeno je da dolazi do pada stabilnosti suspenzije sa povećanjem sadržaja čvrste faze u suspenziji. Veća stabilnost suspenzije uočena je na prirodnoj pH vrednosti ispitivane sirovine. Optimalni parametri za postizanje najbolje stabilnosti suspenzije formirane od topioničke šljake su: finoća mlevenja: 80% -0,075mm; sadržaj čvrstog u suspenziji: 30%; Ca(OH)<sub>2</sub> kao regulator pH vrednosti sredine; vrednosti pH: 4÷5 i prirodna pH vrednost.*

**Ključне reči:** stabilnost, topionička šljaka, stepen otvorenosti sirovine, odnos čvrsto-tečno, pH vrednosti suspenzije

### **Abstract**

*The paper is presented experimental research that aimed to establish stability of the smelting slag. The effect of parameters on the stability of the slag, as well as the degree of openness of the raw materials (milling fineness), the ratio S:L and pH values of pulp, are shown in paper, too. Also, it was determined the optimal values of the following parameters: velocity sedimentation and reading the height of the formation of sludge on the bottom of the glass gauge at certain in-*

---

<sup>1</sup> E-mail: daniela.urosevic@irmbor.co.rs

ervals for different grinding fineness, the relationship S:L and pH values of pulp, in order to obtain maximum stability of slag. The results showed increasing of the stability of the suspension with increasing of content of the class -0.075 mm, especially for grinding fineness from 90% - 0.075 mm. It was also found a decreasing of stability with increasing content of suspended solid phase. Greater stability of the suspension was observed at the natural pH value of raw materials tested. The optimal parameters to achieve the best stability of the suspension are: milling fineness: -0.075 mm 80%, solid content in suspension: 30%,  $\text{Ca(OH)}_2$  as a regulator of pH values; interval of pH values: 4-5, and natural pH value.

**Key words:** stability, smelting slag, milling fineness, relationship solid:liquid, pH values suspension

## 1.0. UVOD

Jedan od glavnih problema u industrijskom procesu flotiranja topioničke šljake je održavanje suspenzije u stabilnom stanju. Suspenzija formirana od topioničke šljake, veštačke tvorevine karakterističnog fizičko-hemijskog sastava, razlikuje se od suspenzija formiranih od prirodnih materijala. Polazeći od navedenog problema u flotaciji topioničke šljake, da se brzim taloženjem krupnih čestica šljake na dno flotacione čelije, u prvim minutima flotiranja, narušava stabilnost, ispitivan je uticaj najznačajnijih faktora na stabilnost suspenzije formirane od topioničke šljake.

Jedna od fizičkih osobina suspenzije je i stabilitet suspenzije. S tim u vezi, ispitivanja su se odnosila na brzinu sedimentacije (formiranje taloga), čestica šljake na dno menzure. Za suspenziju kažemo da je stabilna ukoliko je postignuta njena potpuna homogenost. U suprotnom stabilnost suspenzije je narušena [1].

U industrijskim uslovima flotiranja topioničke šljake, zbog karakterističnog hemijskog i mineraloškog sastava, dolazi do narušavanja stabilnosti pulpe formirane od topioničke šljake, što dalje ima direktnog uticaja na niska tehnološka iskorišćenja korisne komponente, bakra, iz topioničke šljake.

Uzimajući u obzir prethodno iznete konstatacije, osnovni cilj je da, u laboratorijskim uslovima, ispitamo stabilnost suspenzije formirane od topioničke šljake, ispitivanjem optimalnih faktora: *finoće mlevenja, odnosa čvrsto:tečno i pH vrednosti pulpe*.

## 2.0. EKSPERIMENTALNI DEO

### 2.1. Materijali

Za eksperimentalna istraživanja korišćena je topionička šljaka koja se dobija kao nus produkat topljenja koncentrata bakra u plamenim pećima [2]. Šljake plamenih peći, hlađenjem, očvršćavaju u staklastu masu, fajalit, u kome je uprskan bakar i magnetit u dovoljno krupnim kristalima [3].

Nad uzorkom topioničke šljake izvršena je kompleksna hemijska i mineraloška analiza.

Difrakcionom analizom uzorka topioničke šljake, ustanovljeno je prisustvo minerala: fajalita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), i kvarca ( $\text{SiO}_2$ ). Fajalit predstavlja izomorfni niz, koji se u prirodi javlja u mineralu olivina,  $((\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4)$ . Olivin je izomorfna smeša forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) i fajalita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) [3,4].

Hemijskom analizom utvrđen je sadržaj osnovnih elemenata u topioničkoj šljaci. Cu-uk 0,84%; Cu-ox 0,16%; Cu-sulf 0,30%; Cu elem. 0,38%; Ag 3,3 g/t; Au 0,5g/t;  $\text{SiO}_2$  32,77%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  4,86%; Fe-uk 37,05 %;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  9,68%; S 0,81% ; Ca 3,21% ; Mg 0,62%.

### **Indikatori**

- Rodamin B
- Rodamin D

Svrha primene navedenih indikatora je bojenje suspenzije topioničke šljake u jarko ljubičastu boju, koja se dobija njihovom mešavinom, bez ikakvog uticaja i promene na hemijski sastav iste i odigravanja bilo kakvih hemijskih reakcija u formiranoj suspenziji, radi lakšeg praćenja formiranja taloga na dno menzure.

### **Sumporna kiselina - $\text{H}_2\text{SO}_4$**

Sumporna kiselina je uljasta tečnost, dvobazna, bezbojna i vrlo korozivna. Rastvara mnoge metale. Organским materijama oduzima vodu. U vodenom rastvoru disosuje prema sledećoj jednačini :



### **Kalcijum hidroksid - $\text{Ca(OH)}_2$**

U vodenom rastvoru  $\text{Ca(OH)}_2$  disosuje na jone :



U vodenoj sredini reaguje bazno. Rastvorljivost kalcijum hidroksida u vodi je 0,766 g/dm<sup>3</sup>. Nerastvorni ostatak kalcijum hidroksida hidrolizuje, pri čemu se obrazuje jedinjenje  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , koje se kao takvo adsorbuje na površinama čestica.

Kao najefтинiji ima veliku primenu u industriji pri flotiranju rude za postizanje odgovarajuće pH vrednosti pulpe.

### **Natrijum hidroksid - NaOH**

Za razliku od kalcijum hidroksida, baza NaOH u vodenom rastvoru stopostotno disosuje na jone  $\text{Na}^+$  i  $\text{OH}^-$ . Disocijacija u vodi se hemijski predstavlja jednačinom:



#### **2.1. Procedura**

U menzuri zapremine 1 dm<sup>3</sup>, posmatrana je brzina formiranja taloga na dno menzure, grafički predstavljena odnosom, visina formiranja taloga-vreme taloženja.

Ispitivan je uticaj finoće mlevenja od 60%; 75% 80% i 90% učešća klase krupnoće - 0,075 mm, sadržaja čvrstog u suspenziji od 25%; 30% i 35%, i pH vrednosti suspenzije (prirodna pH, intervali pH 4÷5 i 11÷12), na stabilnost suspenzije, uz održavanje ostalih parametara konstantnim.

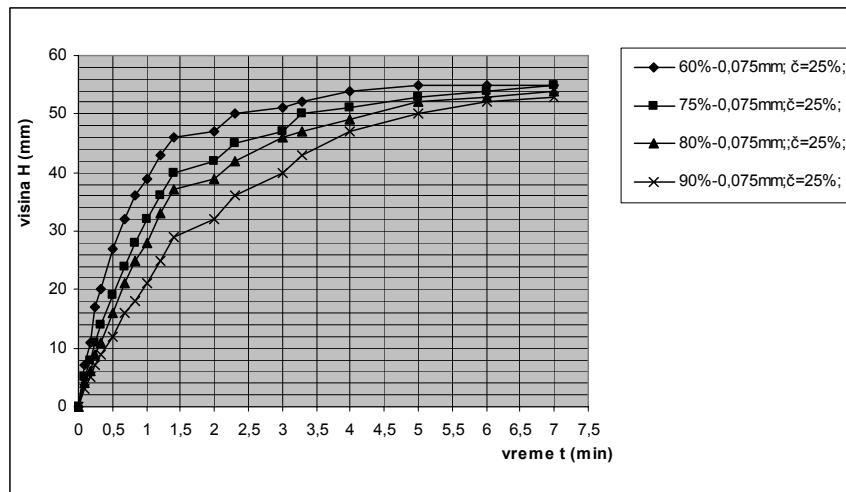
Primenom regulatora pH vrednosti sredine sumporne kiseline, kalcijum hidroksida i natrijum hidroksida, pri različitim pH vrednostima ispitivan je uticaj, na stabilnost suspenzije formirane od topioničke šljake, za finoću mlevenja od 80%-0,075 mm i sadržaj čvrstog od 30%, usvojenih kao optimalni po osnovu prethodnih ispitivanja.

Uticaj ispitivanih faktora na stabilnost, predstavljen je funkcionalnom zavisnošću brzine formiranja taloga od vremena taloženja. Aproksimacijom dobijenih eksperimentalnih krivih, za posmatrani vremenski interval od 0-1,4 min, (prepostavljeni vremenski interval taloženja krupnih čestica na dno flotacione ćelije u industrijskim uslovima), utvrđena je matematička zavisnost ispitivanih uticajnih faktora na stabilnost suspenzije topioničke šljake.

## **3.0. REZULTATI I DISKUSIJA**

### **3.1. Ispitivanje uticaja finoće mlevenja na stabilnost suspenzije**

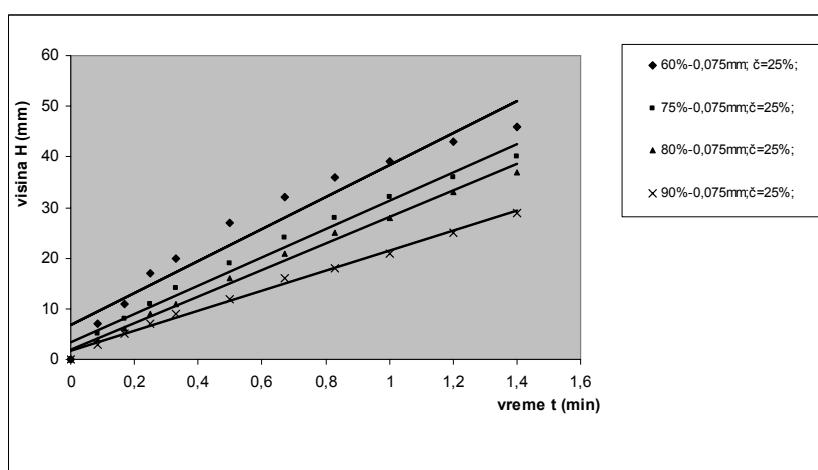
Eksperimentalne krive uticaja finoće mlevenja na stabilnost suspenzije prikazane su na slici 1.



**Slika 1.** Visina formiranja taloga u funkciji vremena za različite finoće mlevenja

U cilju definisanja, zavisnosti koeficijenta pravca pravih k od finoće mlevenja, na dobijenim eksperimentalnim krivama, aproksimacijom je iznadena linearna zavisnost ( $y = kx + n$ ), visine formiranog taloga od vremena taloženja, u intervalu od 0-1,4 min.

Aproksimacija eksperimentalnih krivih u intervalu od 0-1,4 min. prikazana je na slici 2.



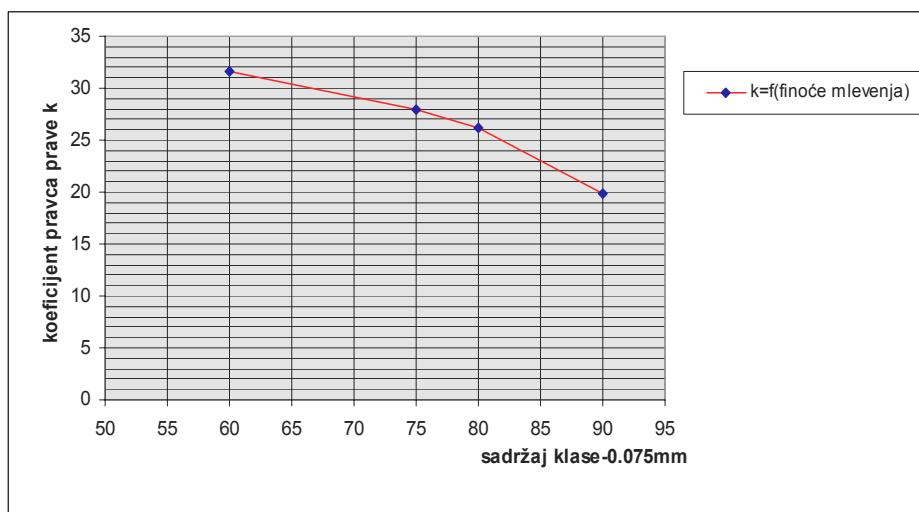
**Slika 2.** Visina formiranja taloga u funkciji vremena za različite finoće mlevenja -aproksimirano

Uslovi izvođenja eksperimenata dati su u tabeli 1.

**Tabela 1.** Uslovi izvođenja eksperimenata

Finoča mlevenja (-0,075 mm)	Vrednost pH	Sadržaj čvrstog u suspenziji %	Jednačina prave linije	Stepen korelacijske
60	Prirodna 7,40	25	$Y=31,593X+6,7968$	$R^2=0,9411$
75	Prirodna 7,40	25	$Y=27,883X+3,4206$	$R^2=0,9829$
80	Prirodna 7,40	25	$Y=26,126X+1,9935$	$R^2=0,9922$
90	Prirodna 7,40	25	$Y=19,831X+1,5841$	$R^2=0,9938$

Grafički prikaz zavisnosti koeficijenta pravca pravih k od finoče mlevenja dat je na slici 3.



**Slika 3.** Zavisnost koeficijenta pravca pravih k od finoče mlevenja

Analizirajući podatke iz tabele 1 i sa slika 1 i 2, može se zaključiti da se sa porastom sadržaja klase -0,075 mm u proizvodu mlevenja šljake, povećava stabilnost suspenzije. Stabilnost suspenzije naročito je izražena kod upotrebe šljake sa finočom mlevenja od 90%-0,075 mm za formiranje iste.

Grafičkim predstavljanjem, funkcionalne zavisnosti koeficijenta pravca prave k od sadržaja klase -0,075 mm, (slika 3) uočava se porast stepena usitnjenosti sirovine sa smanjenjem koeficijenta pravca prave k, što dalje ukazuje na povećanu stabilnost suspenzije topioničke šljake sa većim učešćem

klase -0,075 mm.

Matematički analizirano, sa porastom stepena finoće mlevenja, smanjuje se koeficijent pravca pravih k, što u našem slučaju znači povećanje stabilnosti suspenzije.

Dobijeni visok stepen korelacije pri finoći mlevenja od 90%-0,075 mm, dobro opisuje proces praćenja formiranja taloga u menzuri. Nešto niži stepen korelacije dobijen za finoću mlevenja od 60%-0,075 mm ukazuje na greške koje su zanemarljive, a nastale su zbog teškoća pri praćenju i očitavanju visina u toku postepenog formiranja taloga.

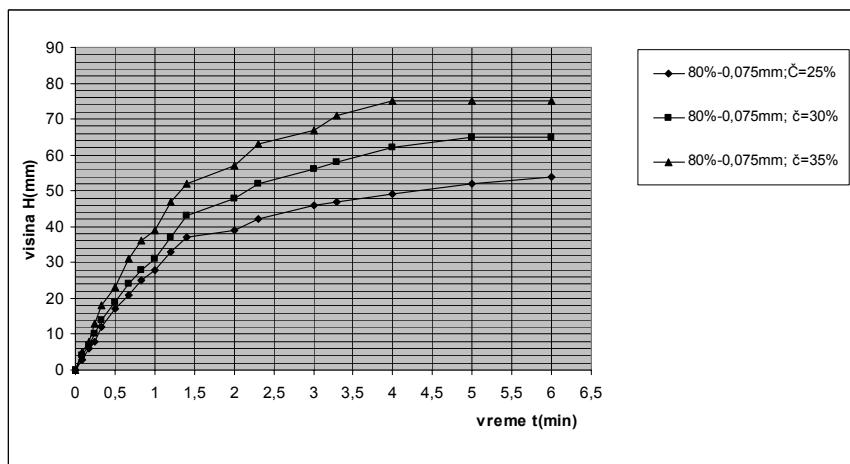
U skladu sa prethodno utvrđenim činjenicama, sledi, da u idealnim uslovima izvođenja eksperimenata, jednačina prave linije bi imala oblik  $y=kx$ . Linearnom aproksimacijom, dobijene su jednačine oblika  $y=kx+n$ , koje pokazuju da se u početnom trenutku  $t=0$ , do početka očitavanja i uključivanja štoperice, stvara izvesna količina taloga na dnu menzure (odsečak na y osi).

Sa druge strane, usitnjavanje, do finoće od 90%-0,075 mm zahteva enormnu potrošnju energije.

Imajući sve napred navedeno u vidu, za dalja ispitivanja, kao optimalna, usvojena je finoća mlevenja od 80% -0,075 mm.

### 3.2. Ispitivanje uticaja sadržaja čvrstog na stabilnost suspenzije

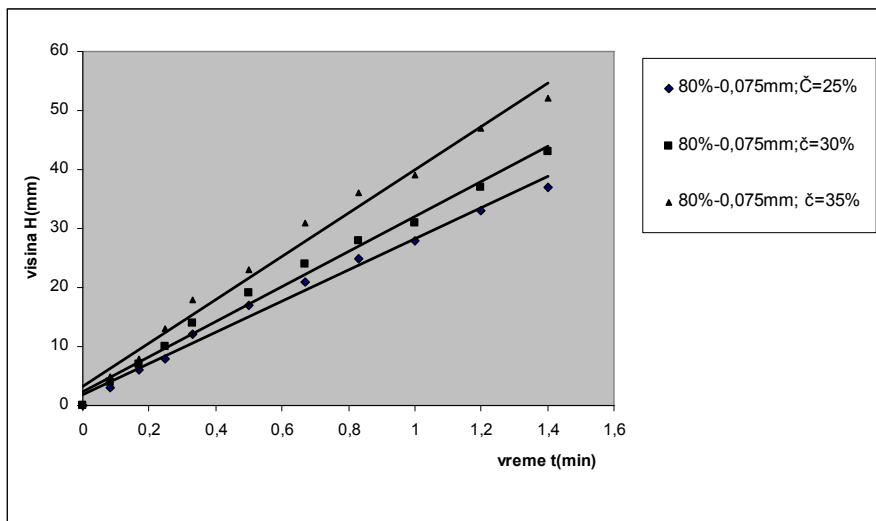
Eksperimentalne krive uticaja sadržaja čvrstog na stabilnost suspenzije prikazane su na slici 4.



Slika 4. Visina formiranja taloga u funkciji vremena za različite sadržaje čvrstog u suspenziji

Aproksimacija eksperimentalnih krivih u intervalu od 0-1,4 min prikazana je na slici 5.

Uslovi izvođenja eksperimenata dati su u tabeli 2.

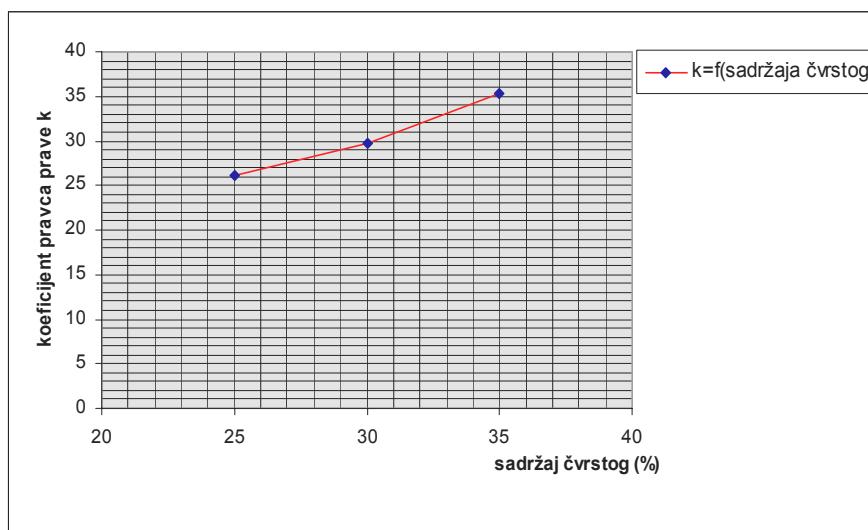


**Slika 5.** Visina formiranja taloga u funkciji vremena za različite sadržaje čvrstog u suspenziji - aproksimirano

**Tabela 2.** Uslovi izvođenja eksperimenata

Finoča mlevenja (-0,075mm)	Vrednost pH	Sadržaj čvrstog u suspenziji %	Jednačina prave linije	Stepen korelacije
80	Prirodna 7,40	25	$Y=26,126X+1,9935$	$R^2=0,9922$
80	Prirodna 7,40	30	$Y=29,814X+2,8369$	$R^2=0,9883$
80	Prirodna 7,40	35	$Y=35,318X+2,8908$	$R^2=0,9937$

Grafički prikaz funkcionalne zavisnosti koeficijenta pravca pravih k od sadržaja čvrstog prikazan je na slici 6.



**Slika 6.** Zavisnost koeficijenta pravca prave k od sadržaja čvrstog u suspenziji

Viskozitet suspenzije je direktno proporcionalan sadržaju čvrstog u suspenziji. Sa povećanjem sadržaja čvrstog u suspenziji raste njen viskozitet i postiže se veća stabilnost. Veliku ulogu u povećanju viskoziteta igraju koloidne čestice. Npr: polustabilne suspenzije prelaze u stabilne ako im se doda vrlo mala količina koloidnih čestica jer njihov viskozitet naglo raste [5].

Analizom rezultata iz tabele 2 i slike 4 i 5, uočava se pad stabilnosti suspenzije sa povećanim sadržajem čvrstog. Matematički analizirano, sa povećanjem sadržaja čvrstog u menzuri raste i vrednost koeficijenta pravih k (slika 6).

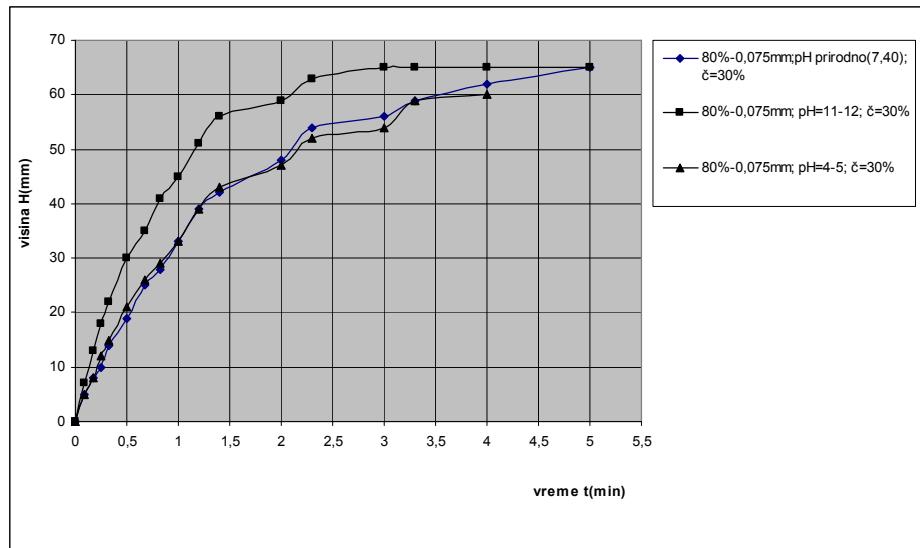
Dobijeni eksperimentalni rezultati su kontradiktorni gore navedenim teoretskim razmatranjima, sprovedenim na prirodnim materijalima, što se može objasniti:

- Prirodnom same sirovine, čiji se stabilnost ispituje (veštačka tvorevina);
- Uslovima izvođenja eksperimenta u menzuri (statička stabilnost).

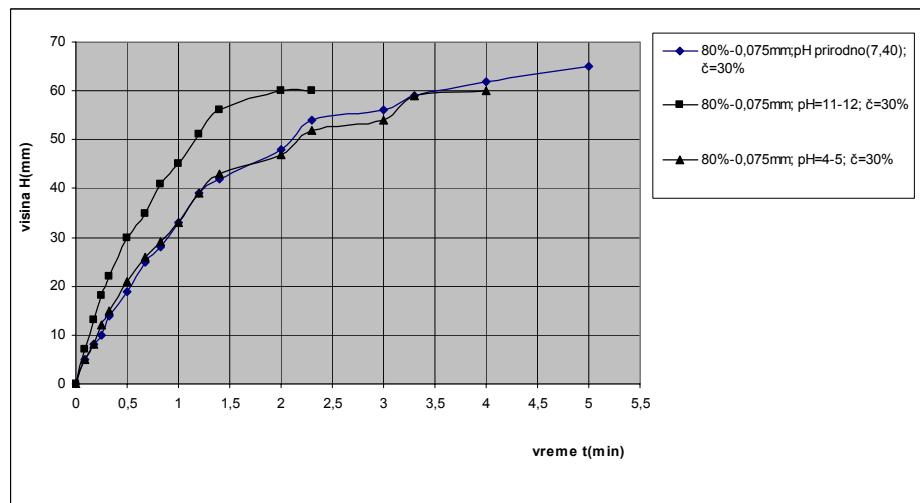
Po osnovu gore izvedenih konstatacija, mnogobrojnih laboratorijskih ispitivanja i primene u industriji, sadržaj čvrstog od 30% smatra se optimalnim za dalja istraživanja.

### 3.3. Ispitivanje uticaja pH vrednosti sredine na stabilnost suspenzije

Eksperimentalne krive uticaja pH vrednosti sredine na stabilnost suspenzije primenom regulatora sredine: sumporne kiseline, kalcijum hidroksida i natrijum hidroksida, prikazane su na slikama 7 i 8.



Slika 7. Visina formiranja taloga u funkciji vremena uz dodatak regulatora pH vrednosti sredine  $\text{NaOH}$  i  $\text{H}_2\text{SO}_4$

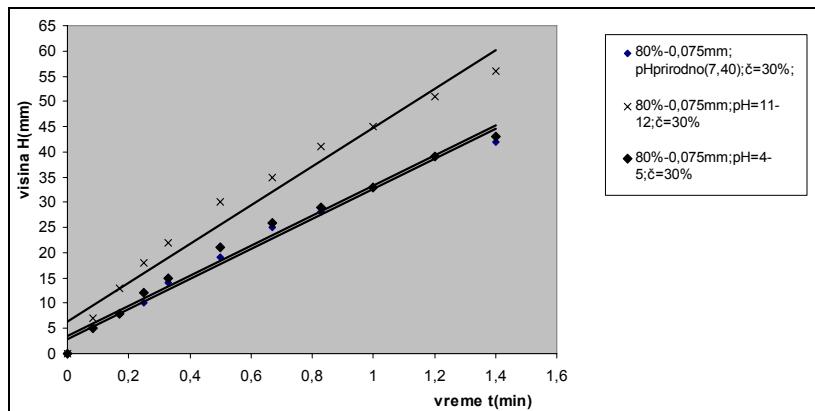


Slika 8. Visina formiranja taloga u funkciji vremena uz dodatak regulatora pH vrednosti sredine  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i  $\text{H}_2\text{SO}_4$

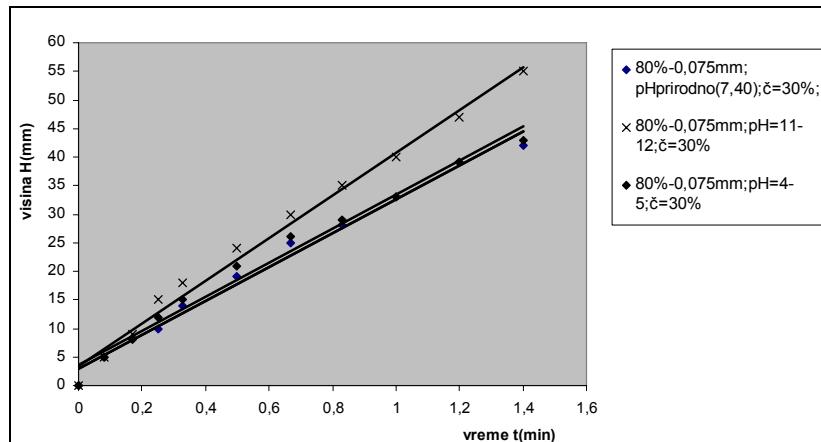
Uslovi izvođenja eksperimenata dati su u tabeli 3. Aproksimacija eksperimentalnih krivih u intervalu od 0-1,4 min prikazana je na slikama 9 i 10.

Tabela 3. Uslovi izvođenja eksperimenata

Regulat or pH	Sadr. čvrsto g (%)	Stepen otvorenosti sirovine (-0,075mm)	Vrednost pH	Jednačina prave linije	Stepen korelaciјe
/	30	80	Prirodna	$Y=29,814X+2.8369$	$R^2=0,9883$
Ca(OH) <sub>2</sub>	30	80	11÷12	$Y=37,443X+3.3752$	$R^2=0,9893$
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30	80	4÷5	$Y=29,837X+3.5507$	$R^2=0,9821$
NaOH	30	80	11÷12	$Y=38,363X+6.4737$	$R^2=0,9662$



Slika 9. Visina formiranja taloga u funkciji vremena uz dodatak regulatora pH vrednosti sredine NaOH i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - aproksimirano



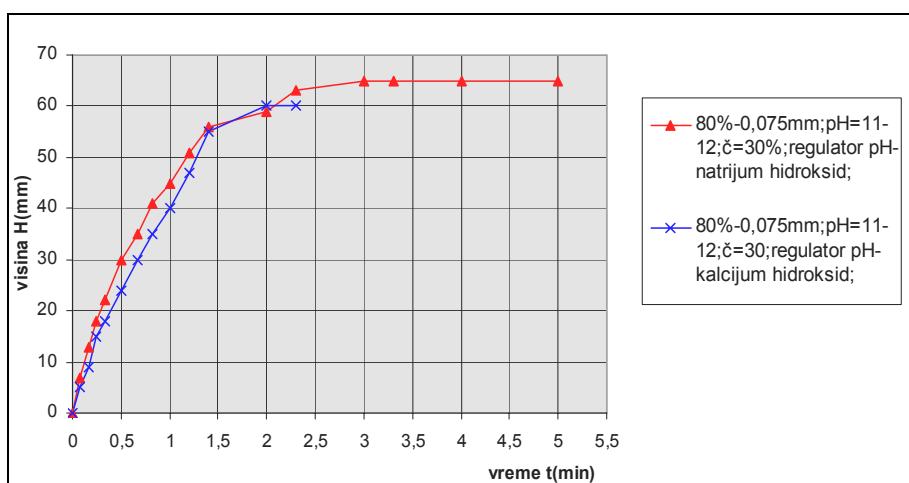
Slika 10. Visina formiranja taloga u funkciji vremena uz dodatak regulatora pH vrednosti sredine Ca(OH)<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - aproksimirano

Analizom podataka iz tabele 3 i slika 7-10, uočava se veća stabilnost suspen-

zije na prirodnoj pH vrednosti ispitivane sirovine. Povećana stabilnost suspenzije uočena je i na nižim pH vrednostima sredine, interval pH vrednosti od 4÷5.

Primenom regulatora pH vrednosti sredine, natrijum hidroksida i kalcijum hidroksida, za regulisanje intervala pH vrednosti sredine od 11÷12, postignuta je najmanja stabilnost suspenzije. Matematički dobijene vrednosti koeficijenta  $k$  u pomenutom intervalu, (tabela 3), ukazuju na najnižu stabilnost suspenzije topioničke šljake, tj. brže formiranje taloga na dnu menzure.

Jasniji, paralelni prikaz ostvarenih rezultata stabilnosti, pri primeni regulatora pH vrednosti sredine:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i  $\text{NaOH}$ , dat je na slici 11.



Slika 11. Uporedni prikaz visine formiranja taloga u funkciji vremena sa regulatorima pH vrednosti sredine  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i  $\text{NaOH}$

Uporednom grafičkom analizom (slika 11) i matematičkom analizom dobijenih jednačina pravih (tabela 3), izvodi se zaključak, postizanja bolje stabilnosti suspenzije primenom kalcijum hidroksida kao regulatora pH vrednosti, za posmatrani interval pH od 11÷12.

Ovo se može objasniti nepotpunom disocijacijom kalcijum hidroksida, pri čemu nerastvorni ostatak ove baze, obrazuje jedinjenje  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \times \text{H}_2\text{O}$  i u takvom obliku adsorbuje na površinama čestica u vodenoj suspenziji. Baza, natrijum hidroksid, za razliku od kalcijum hidroksida, ne obrazuje molekulske nanelektrisane hidrate [6].

Primena kreča kao najefтинije baze je opravdana, niža cena i do 3 puta u odnosu na bazu natrijum hidroksid, kako za regulisanje pH vrednosti sredine, u realnim industrijskim uslovima vođenja procesa flotacije topioničke šljake u borskoj flotaciji (interval pH od 11÷12), tako i za dalja laboratorijska istraživanja. Takođe, isključena je mogućnost flotiranja topioničke šljake u kiseloj sredini, zbog neadekvatnosti opreme u postojećem pogonu kao i floti-

ranje na prirodnoj pH vrednosti iste, jer se u istom pogonu flotira i ruda, pa je pH vrednost povratne vode visoka.

#### 4.0. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem uticaja finoće mlevenja na stabilnost suspenzije, izvodi se zaključak da se sa porastom sadržaja klase -0,075 mm u proizvodu mlevenja šljake, povećava stabilnost suspenzije. Stabilnost suspenzije naročito je izražena kod upotrebe šljake sa finoćom mlevenja od 90%-0,075 mm za formiranje iste. Sa druge strane, usitnjavanje do gore navedene finoće zahteva enormno visoku potrošnju energije, što bi gledano sa aspekta usitnjavanja šljake u industriji bilo ekonomski neopravdano, te je iz istih razloga kao optimalna, usvojena finoća mlevenja od 80%-0,075 mm.

Uporednom analizom visine formiranja taloga na dno menzure, za ispitivani uticaj sadržaja čvrstog na stabilnost suspenzije, kao i po osnovu mnogobrojnih prethodnih laboratorijskih ispitivanja i primene u industriji flotiranja topioničke šljake, sadržaj čvrstog od 30%, usvaja se kao optimalan.

Primenom regulatora pH vrednosti sredine: sumporne kiseline, baza natrijum hidroksida i kalcijum hidroksida, ispitivan je uticaj pH vrednosti sredine na stabilnost suspenzije. Grafičkom interpretacijom uporedne analize ostvarenih rezultata, konstatovana je veća stabilnost, na prirodnoj pH vrednosti suspenzije, formirane od topioničke šljake, kao i u posmatranom intervalu pH vrednosti sredine od 4÷5, u odnosu na ispitivani interval pH vrednosti 11÷12, u kome je ostvarena najmanja stabilnost suspenzije.

Uporednom analizom koeficijenata pravca pravih k, za posmatrani interval pH vrednosti sredine od 11÷12 (industrijski interval flotiranja topioničke šljake), uočava se bolja stabilnost suspenzije primenom kalcijum hidroksida (niža vrednost koeficijenta pravca prave k, manja brzina formiranja taloga) u poređenju sa natrijum hidroksidom (veća vrednost koeficijenta pravca prave k, veća brzina formiranja taloga).

Primena kalcijum hidroksida kao najefтинije baze je opravdana, niža cena i do tri puta u odnosu na bazu natrijum hidroksid, kako za regulisanje pH vrednosti sredine, u realnim industrijskim uslovima vođenja procesa flotacije topioničke šljake u borskoj flotaciji (interval pH od 11÷12), tako i za dalja laboratorijska istraživanja.

**Zahvalnica**

*Rad je proizašao iz projekta Tehnološkog razvoja br. 17016 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, kao i iz magistarskog rada „Ispitivanje stabiliteta pulpe formirane od topioničke šljake za proces flotiranja“.*

**LITERATURA**

- [1] R. Ačić, N. Magdalinović, M. Trumić, Lj. Šutulović, Odvodnjavanje i jalovišta, Beograd, 2001.
- [2] M. Ćriković, Teorijska i eksperimentalna proučavanja procesa prženja sulfidnih bakarnih koncentrata u reaktoru sa fluidizacionim slojem primenom vazduha obogaćenog kiseonikom, Magistarski rad, TMF, Beograd, 1999.
- [3] A. Sarrafi, B. Rahmati, H. Hassani, Recovery of copper from reverberatory furnace slag by flotation, Minerals Engineering, Vol. 17, 3 (2004) 457-459.
- [4] P. Ney, Zeta potentielle und flotierbarkeit von mineralen, Springer-Verlag, New York, 1973.
- [5] A. M. Spasić, Višefazni disperzni sistemi, Beograd, 1997.
- [6] L. Mitra, A Textbook of inorganic chemistry, Calcutta, 1962.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 669.3:697.1(045)=861

NAUČNI RAD

*Oblast: Energetska efikasnost*

### **EFEKTI KORIŠĆENJA SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLOTE METALURGIJE BAKRA U TOPLIFIKACIONIM SISTEMIMA**

### **EFFECTS OF USING OF SECONDARY (WASTE) HEAT OF COPPER METALLURGY IN HEATING SYSTEMS**

Milanče Mitovski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rudarsko-topioničarski basen Bor Grupa, Bor

#### **Izvod**

*Veliki broj tehnoloških i drugih procesa se odvijaju na visokim temperaturama, a dosta njih su egzotermni, u potpunosti ili delimično. Iz njihove kontrolne granice se oslobađa velika količina toplotne (i hemijske) energije kao sekundarna (otpadna), koja se uglavnom ispušta u okolinu narušavajući, pri tome, ravnotežu eko-sistema i povećavajući entropiju življenja. Nivoi razvoja tehničko-tehnoloških sistema, danas, nisu u mogućnosti da uvek „zaokruže“ materijalne struje u kontrolnoj granici procesa. U vezi s tim, ovaj rad ukazuje na mogućnosti korišćenja sekundarne (otpadne) toplotne energije sa proizvodima i pratećim materijalnim strujama podižući, osim tehnološke, i energetske efikasnosti u procesu i generalno privrednog subjekta. Na ovaj se način smanjuje potrošnja energenata za iznos ekvivalenta sekundarne energije. Osim energetskih i ekonomskih efekata, životna sredina može biti oslobođena dodatnih zagadživanja gasovitim i drugim produkutima sagorevanja goriva (čije su komponente CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> itd. i velike količine poletine). Konkretizacija ove problematike je izvršena za pirometalurški proces proizvodnje bakra u RTB-Bor Grupa u Boru, Republika Srbija.*

**Ključne reči:** sekundarna (otpadna) toplota, bakar, koncentrat bakra, zagrevanje, topla potrošnja voda.

#### **Abstract**

*A large number of technological and other processes take place at high temperatures; a lot of them are exothermal, fully or partially. From their control limits a large amount of heat (and chemical) energy has been released as waste (secondary) energy and mostly emitted into the environment. It jeopardizes the environment and, in addition, the balance of eco-system and increases living entropy. The development level of technical-technological systems today is not*

---

<sup>1</sup> E-mail: mitovskimilance@open.telekom.rs

*always able to "round" the material currents in control border of the processes. Thereby, this paper points to the possibilities of the energy use within products and related material currents, increasing technological and energy efficiency in the process, and generally industrial subjects. The consumption of energy (such as primary energy) for the equivalent amount of waste (secondary) energy is reduced in this way. In addition to energetic and economic effects, the environment may be exempt from additional pollution, and other gaseous products of fuel combustion (which components are CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, etc., plus large amounts of smoke dust). Concretization of that problem was done for the metallurgical process of copper production in the RTB Bor Group, Bor (Republic of Serbia). The calculation of material and heat balances of the process, with special attention given to the determination of the secondary (waste) high-temperature heat energy of the process, is presented in this paper. Special importance for the increasing of energetic efficiency of the process is defining of technically usable heat of the mentioned process, as the main priority. The results of the investigation are also related to the quantity of heat energy given to the environment and determination of "excess" heat of the process area and gas products.*

**Key words:** waste (secondary) heat, copper, copper concentrate, heating, hot consumable water.

## OPŠTA RAZMATRANJA

U industriji se skoro polovina energije gubi kao sekundarna (*otpadna*) toplotna energija u okolinu, izazivajući razne ekološke poremećaje i probleme. Otpadna toplota se prenosi gasovitim produktima procesa, vodom, vazduhom, šljakom, poletinom i odavanjem toplote u okolinu. Otpadna toplota, zavisno od procesa, može se svrstati uslovno, prema temperaturi njenog nosioca, u nekoliko grupa:

- visokotemperaturska, iznad 650 °C,
- srednjotemperaturska, 100÷650 °C i
- niskotemperaturska, ispod 100 °C.

U zavisnosti od nosilaca sekundarne (otpadne) toplotne energije, razlikuju se:

- sekundarna energija gasovitih produkata,
- sekundarna energija proizvoda i nusproizvoda,
- sekundarna energija sadržana u tehnološkoj i rashladnoj vodi.

Sekundarna (*otpadna*) energija predstavlja znatnu stavku u energetskom i eksnergetskom bilansu procesa i postrojenja. Prema tome, ona zaslužuje da se iskorene stavovi o tome da ona predstavlja nužno зло, jer je u velikom broju slučajeva ta energija mnogo vrednija od primarne energije [1,2]. U tabeli 1 prikazani su parametri otpadne toplote u pojedinim metalurškim procesima u proizvodnji bakra.

**Tabela 1.** Količina sekundarne (otpadne) toplote u Topionici u Boru u kJ/kg  
suvog koncentrata s.k.)

Proces	Gasovi	Šljaka	Anodni bakar	“Višak” toplote	Ukupno
Prženje	762,908			424,929	1.187,837
Topljenje	1.998,705	1.211,464			3.210,169
Konvertovanje	1.149,956			331,813	1.481,769
Plamena rafinacija	193,773		106,289		300,062
Ukupno:	4.105,342	1.211,464	106,289	756,7420	6.179,837

Korišćenjem sekundarne energije stvara se mogućnost za smanjenje potrošnje primarne energije. Primena utilizacionih parnih kotlova, regenerativnih i rekuperativnih razmenjivača toplote, toplotnih pumpi, sušare i sličnog, ima svoje tehničko-tehnološko i ekonomsko opravdanje. Posebno je interesantna u industrijskim granama koje su veliki potrošači energije s jedne strane, a sa druge, veliki “proizvođači” sekundarne (otpadne) energije kao što su metalurški i hemijski kombinatni.

U zavisnosti od fizičkih, mehaničkih i toplotnih osobina nosilaca, sekundarna (otpadna) toplotna energija iz procesa može biti iskorišćena na različite načine, i to:

1. Gasovi više i srednje temperature mogu služiti za predgrevanje vazduha za sagorevanje goriva pomoću razmenjivača toplote i za proizvodnju električne i toplotne energije, koristeći utilizacione parne i vrelovodne kotlove;
2. Gasovi srednje temperature mogu se koristiti za predgrevanje vazduha, napojne vode za parne kotlove i druge svrhe;
3. Izlazni gasovi i rashladna voda mogu se koristiti za zagrevanje tečnosti, vazduha i slično;
4. Zagrejani odsisani vazduh u ventilacionim sistemima može se koristiti za predgrevanje svežeg vazduha koji se ubacuje u prostoriju;
5. Kondenzat pare koji se vraća u parni kotao može se koristiti za grejanje potrošne vode. Kondenzat pare višeg pritiska može se koristiti za proizvodnju pare niskog pritiska;
6. Topli vazduh od hlađenja kompresora, elektromotora i hidrauličnih sistema može se koristiti za grejanje prostorija;
7. Stalna otpadna toplota niže temperature može se koristiti za grejanje isparivača toplotnih pumpi.

Korišćenjem sekundarne (otpadne) toplote tehnoloških procesa, najbolji energetski efekti se postižu kada se energija na neki način vraća u proces, i to: predgrevanjem vazduha, zagrevanjem i sušenjem sirovine i goriva itd. Korišćenje visokotemperaturske sekundarne energije u mnogim slučajevima

ima prednost u odnosu na primarnu energiju, a naročito na sledeći način:

1. Iskorišćenjem sekundarne (*otpadne*) energije smanjuje se potrošnja primarne energije za ekvivalent toplove sekundarne energije, a još više, imajući u vidu da se odvijanjem pojedinih tehnoloških procesa neminovno proizvodi sekundarna energija;

2. Supstitucijom primarne energije sekundarnom smanjuje se potrošnja neobnovljive energije, a uticaji su osim ekonomskih i ekološki, tokom niza godina na floru i faunu;

3. Postrojenja za korišćenje sekundarne energije su jeftinija od onih za korišćenje primarne energije, za istu snagu, jer nemaju skladište za gorivo, uređaje za pripremu goriva, pa čak ni, u većini slučajeva, prostor i uređaje za sagorevanje goriva.

Primena toplotnih pumpi u industriji pruža široke mogućnosti, pre svega, na strani toplotnog izvora, a potom i toplotnog ponora i omogućava iskorišćenje niskotemperaturske otpadne toplove. Uobičajeno je da veza toplotnog izvora i ponora bude u sklopu samog industrijskog pogona. To znači, da je toplotni izvor deo tehnološkog procesa iz koga se odvodi toplota, a toplotni ponor deo istog procesa kome treba dovoditi toplotnu energiju. Posrednici između toplotnog izvora i toplotnog ponora mogu biti fluidi pa i same radne supstance tehnološkog procesa, ali su to najčešće voda ili vazduh.

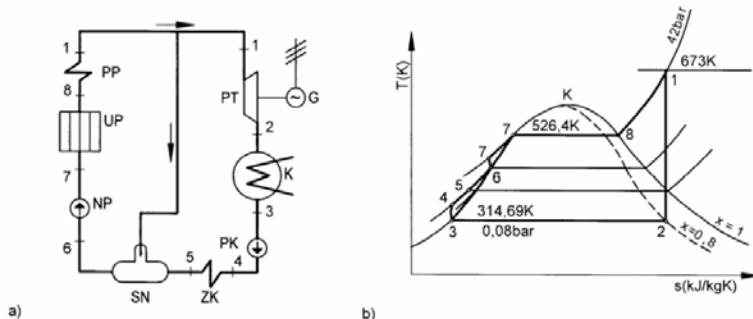
## SEKUNDARNA (OTPADNA) ENERGIJA U TOPIONICI BAKRA

Pirometalurški proces za proizvodnju anodnog bakra, koji se odvija u Topionici RTB-Bor u Boru, pripada visoko temperaturnim procesima. Tehnološka šema proizvodnje anodnog bakra sledeća je: šarža (*koncentrat i topitelji*) prže se u fluo-solid reaktoru, prženac se topi u plamenoj peći, konvertovanje se odvija u obrtnom Peirce-Smith konvertoru i plamena rafinacija u obrtnoj anodnoj peći [3].

Produkti pojedinačnih faza pirometalurgije bakra sadrže veliku količinu toplotne energije [4]. Deo sadržane toplotne energije se vraća u proces, a deo predstavlja sekundarnu toplotnu energiju koja se nepovratno gubi [5]. Deo toplotne energije prženca, bakrena, šljake konvertovanja i plamene rafinacije i blister bakra koristi se u procesu. U postojećim uslovima, u Topionici bakra u Boru, iskorišćenje toplotne energije iznosi 25,95%, a samo u tehnološkom procesu 13,37%. Toplotna energija utrošena za proizvodnju pregrijane vodene pare u utilizacionim parnim kotlovima plamenih peći čini 12,58% ukupno dovedene toplotne za proizvodnju anodnog bakra [6].

Tehnološki proces proizvodnje bakra u metalurško-hemijskom kompleksu RTB-Bor Grupe "produkuje" zavidne količine visokotemperaturske sekundarne (*otpadne*) toplotne energije, koja se nekontrolisano u većem delu "gubi" u okolini. Tako, u pirometalurškoj proizvodnji bakra "produkuje" se sekundarna toplotna energija 1,621 kW<sub>th</sub>/kg suvog koncentrata ili raspoloživa toplota (*koja*

*predstavlja razliku toplote na izlazu iz peći i toplotne na temperaturi koja je iznad temperature tačke rose sumporne kiseline gasova) 1,315 kW<sub>t</sub>/kg suvog koncentrata. Za projektovani kapacitet topionice bakra u Boru<sup>2</sup> raspoloživa toplotna snaga sekundarne energije je 92,111 MW<sub>t</sub>, što je ekvivalentno snazi paro-turbinskog termopostrojenja, u kome se izvršava realni Rankine-Clausius-ov toplotni ciklus, u visini od 28,334 MW<sub>e</sub>, sl. 1.*



Sl. 1. Šema termoenergetskog kondenzacionog parnog bloka [6]

a) šema postrojenja, b) Ts-(temperatura-entalpija) dijagram idealnog Rankine-Clausiusovog toplotnog ciklusa. UP- utilizacioni parni kotao, NP- napojna pumpa, PP- pregrejač pare, PT- parna turbina, G- generator, K- kondenzator pare, PK- pumpa kondenzata, ZK- zagrejač kondenzata, SN- spremnik napojne vode

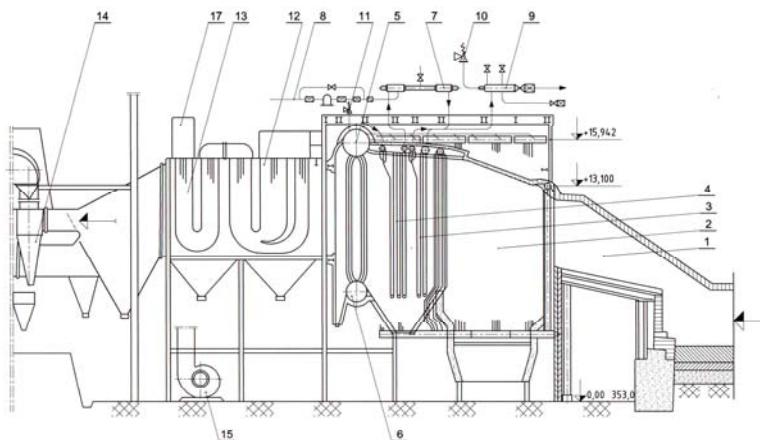
Tehnički iskoristiva sekundarna energija iznosi  $4.647,1499 \text{ kJ/kg}_{\text{s.k.}} = 1,315 \text{ kW}_t/\text{kg}_{\text{s.k.}}$ , a snaga kondenzacione parne turbine  $1.608,307 \text{ kJ/kg}_{\text{s.k.}} \cdot 11,19 \text{ kg}_{\text{s.k.}}/\text{s} = 17.996,955 \text{ kW}_e$ .

U topionici bakra RTB-Bor koristi se, u dosadašnjim uslovima, samo sekundarna toplotna energija gasova plamenih peći za proizvodnju pregrejane pare i za zagrevanje vazduha za sagorevanje goriva u plamenim pećima. Za hlađenje gasova plamene peći broj 1 je ugrađen jedan utilizacioni parni kotao (*interna oznaka UK-1, čiji je poprečni presek prikazan na sl. 2*), a za hlađenje gasova plamene peći broj 2 su ugrađena dva utilizaciona parna kotla (*UK-3 i UK-4*).

Utilizacioni parni kotao (UK-1) je ekrанизiran sa dva stepena pregravanja pare, tunelske konstrukcije i sa višećim cevima grejnih površina. U nastavku parnog kotla je postavljen zagrejač sekundarnog vazduha, gde se vazduh dodatno zagрева по излaskу из парног загрејача са температуре од  $140^\circ\text{C}$ , где је он предхodno predgrijan, на  $400^\circ\text{C}$ . Stepen iskorišćenja utilizacionog parnog kotla iznosi 0,53, а ukupno sa zagrejačem sekundarnog vazduha 0,7560. Eksergetski stepen

<sup>2</sup> U zadnjoj deceniji rad metalurškog kompleksa RTB-Bor, zbog situacije u privredi u Srbiji, radi sa smanjenim kapacitetom

iskorišćenja utilizacionog parnog kotla je 0,3078, a ukupno sa zagrejačem sekundarnog vazduha iznosi 0,4104, [3]. U periodu 1974. do 2008. godine utilizacioni parni kotao broj 1 je proizveo 3 968 548 t pare ili u proseku 0,549  $t_{\text{pare}}/t_{\text{suvog koncentrata}}$  (što je ekvivalentno na oko 3,159 TW·h toplotne energije, to jeste 92,912 GW·h/a).



**Sl. 2. Uzdužni presek utilizacionog parnog kotla (UK-1), koji je ugrađen iza plamene peći broj 1 u Topionici bakra u Boru Srbija (kapaciteta 24,95 t/h pare pritiska 44 bar i temperature 440°C) [3]**

- 1-ulaz gasovitim produkata u parni kotao (uptacke), 2-ekranske cevi,
- 3-pregrejač pare II stepena, 4-pregrejač pare I stepena, 5-gornji doboš parnog kotla,
- 6-donji doboš parnog kotla, 7-hladnjak pare, 8-instalacija za dovod kotlovske vode,
- 9-sabirnica pare, 10-glavni ventil sigurnosti, 11-ventil sigurnosti na dobošu,
- 12-drugi stepen zagrejača sekundarnog vazduha, 13-prvi stepen zagrejača sekundarnog vazduha, 14-cikloni za grubo otprašivanje gasovitim produkata plamene peći,
- 15-ventilator sekundarnog vazduha, 16-plamena peć,
- 17-parni predgrejač sekundarnog vazduha

## AKTUELNO ISKORIŠĆENJE OTPADNE (SEKUNDARNE) TOPLOTNE ENERGIJE U RTB-BOR

U postojećim uslovima proizvodnje bakra u Topionici RTB-Bor u Boru, Srbija korišćenje otpadne (sekundarne) toplotne energije je od sledećih proizvoda:

1. Toplota prženca iz fluosolid reaktoru se koristi u procesu topljenja u plamenoj peći,
2. Toplota bakrenca iz plamene peći se koristi u konvertoru,
3. Fizička toplota gasovitim produkata procesa topljenja prženca u plamenoj peći se koristi u utilizacionim parnim kotlovima za proizvodnju pregrevane pare

i za zagrevanje sekundarnog vazduha,

4. Toplota blister bakra se koristi u procesu plamene rafinacije u anodnim pećima,

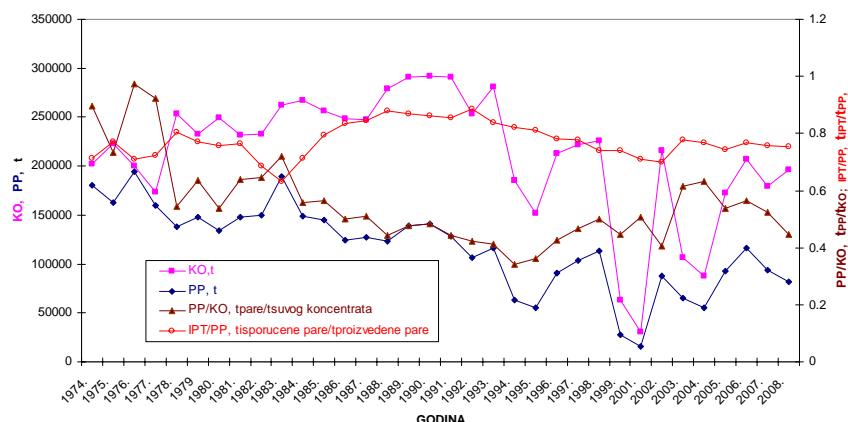
5. Fizička toplopa šljake konvertora se koristi u procesu topljenja bakrenca u plamenoj peći,

6. Fizička toplopa šljake procesa plamene rafinacije se koristi u konvertoru.

Ostala otpadna (sekundarna) toplopa energija od: gasova prženja, konvertovanja i plamene rafinacije, toplopa od šljake plamene peći, anodnog bakra, kondenzata pare, rashladne vode nakon hlađenja agregata i uređaja i slično "gubi" se u okolini, narušavajući, pri tome, eko-sistem.

Proizvedena para u utilizacionim parnim kotlovima (*plamenih peći, tačka 3 ovog poglavlja*), osim za zagrevanje vazduha, koristi se za sušenje uglja, za zagrevanje mazuta, za tehnološke potrebe u pogonu regeneracije elektrolita i Fabrike tehničkog kiseonika i za zagrevanje deo prostorija u grejnem periodu, a preostali deo proizvedene pare (80,33%) se isporučuje Termoelektrani RTB-Bor, gde se koristi za toplifikacione svrhe i priprema tople potrošne vode za potrebe pogona RTB-Bor, a preostali deo služi za proizvodnju električne energije. Prosečne vrednosti parametara proizvedene pare se kreću u granicama: pritisak 29÷42 bara i temperatura pregrijane pare 396÷431°C. Raspoloživa toplopa proizvedene pare može se uzeti da je ekvivalentna sa 0,798 MW<sub>h</sub>/t pare ili 0,098 t<sub>eu</sub>/t<sub>pare</sub>.[7].

Na sl. 3. je prikazana godišnja proizvodnja pare SP u utilizacionom parnom kotlu (UK-1) u Topionici bakra RTB-Bor Srbija, godišnja prerada suvog koncentrata bakra KO, specifična proizvodnja pare  $t_{PP}/t_{KO}$  i učešće isporučene pare Termoelektrani IPT/PP za period 1974. do 2008. godine.



Sl. 3. Zaviosnost proizvedene količine pare (PP) i preradene količine suvog koncentrata bakra(KO) u topionici u Boru

Količina pare, proizvedene u Topionici bakra, koja je isporučena Termoelektrani u Boru ( $IPT, t/a$ ), u periodu 1974-1995. godine, u proseku, iznosi 80,33% od ukupne količine proizvedene pare u utilizacionim parnim kotlovima plamenih peći (UK-1, 3 i 4) ( $PP, t/a$ ), pri čemu, minimalna količina isporučene pare iznosi 63,33%, a maksimalna 88,66% od ukupne količine proizvedene pare.

Analizom vremenskih serija godišnje proizvodnje pare u utilizacionim parnim kotlovima ( $PP, t/a$ ) za rad Topionice bakra u Boru u periodu 1974. do 2008. godine (ukupno 34 godina), na osnovu sl. 3, su prikazane jednačinom (1). Jednačinama (2) i (3) su prikazane vremenske serije promene specifične proizvodnje pare po jedinici prerađene mase koncentrata bakra i ideo isporučene pare Termoelektrani od proizvedene pare u utilizacionim parnim kotlovima u Topionici bakra RTB-Bor u Boru, Srbija. U jednačinama (1) do (3)  $Y$  označava redni broj godina obuhvaćenih vremenskom serijom, gde je  $1 \leq Y \leq 34$ .

Godišnja proizvodnja pare u utilizacionim parnim kotlovima u Topionici bakra:

$$PP = 1.1239 Y^4 - 64.932 Y^3 + 1130.3 Y^2 - 9822.3 Y + 186868, t_{PP}/a, R^2 = 0.7304 \quad (1)$$

Specifična proizvodnja pare u Topionici bakra po jedinici mase koncentrata bakra:

$$PP/KO = -3 \cdot 10^{-6} (Y)^4 + 0.0002 (Y)^3 - 0.0034 (Y)^2 - 0.0136 (Y) + 0.8771, t_{PP}/t_{KO}, R^2 = 0.7264 \quad (2)$$

Udeo isporučene pare Termoelektrani ( $IPT/PP$ ) u 1t proizvedene pare u utilizacionim parnim kotlovima u Topionici bakra:

$$IPT/PP = 4 \cdot 10^{-6} (Y)^4 - 0.0003 (Y)^3 + 0.0066 (Y)^2 - 0.0423 (Y) + 0.8012, t_{IPT}/t_{PP}, R^2 = 0.4796 \quad (3)$$

Korelace jednačine za količinu isporučene pare Termoelektrani ( $IPT$ ) i ideo količine isporučene pare Termoelektrani u odnosu na proizvedene pare u utilizacionim parnim kotlovima u Topionici bakra ( $IPT/PP$ ), za period od jedne godine, prikazane su izrazima (4) i (5).

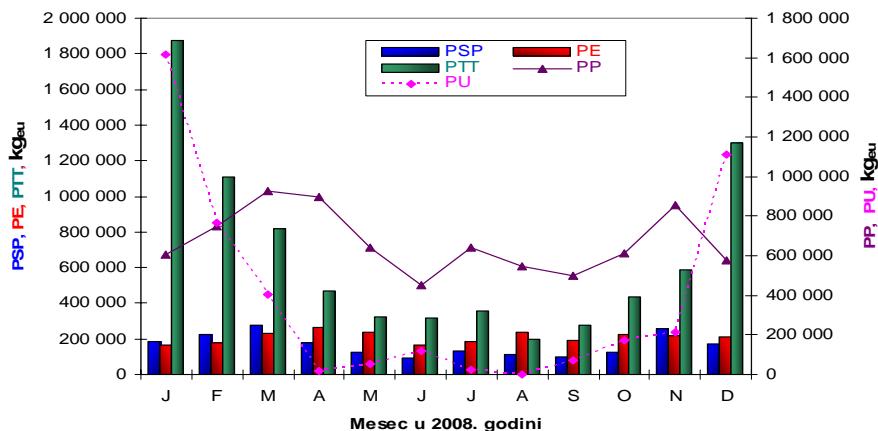
$$IPT_{TE} = -144091.274 + 2.420(PP) - 0.0000037(PP)^2, t \text{ pare}/a \quad (4)$$

$$IPT/(PP) = 0.40119553 + 0.00000473(PP) - 1.1366 \cdot 10^{-11}(PP)^2, \text{ tona isporučene pare Termoelektrani za 1t proizvedene pare u utilizacionim parnim kotlovima.} \quad (5)$$

U periodima kada se proizvodi električna energija u Termoelektrani u Boru, specifična potrošnja pare, za period od 29 meseci u proseku, iznosi 7,843 kg pare/ $kW_e h$  proizvedene električne energije (ili  $22.509,41 \text{ kJ}/kW_e h$ ), što odgovara neto stepenu iskorišćenja toplotnog ciklusa turboagregata od oko 0,1599, ili sa utilizacionim parnim kotlom neto 0,1209 i bruto 0,1591, [3].

Na slikama 4 i 5 je prikazana promena mesečne proizvodnje pare u Topionici bakra ( $PP$ ). Potrošnja uglja Termoelektrani ( $PU$ ), potrošnja sopstvene pare u Topionici bakra ( $PSP$ ), Potrošnja pare u elektrolizi bakra ( $PE$ ) i potrošnja

toplote na toplifikaciji pogona TIR-a i ostale potrošnje skupa (PTT) izražene u tonama ekvivalentnog uglja<sup>3</sup>. Period analiziranja je 2008. godina.

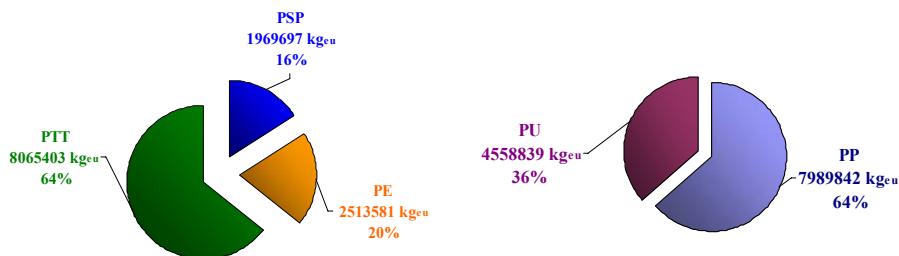


Sl. 4. Proizvodnja pare u Topionici bakra (PP), potrošnja uglja u TE (PU), potrošnja sopstvene pare u Topionici (PSP), elektrolizi (PE) i za toplifikaciju poslovnog i radnog prostora TIR-a i ostalo (PTT) izražene u kg ekvivalentnog uglja (coal equivalent) u 2008. godini

Proizvodnja toplotne energije (*sadržane u proizvedenoj pari PP*) u utilizacionom parnom kotlu UK-1 u poslovnoj 2008. godini, korišćenjem sekundarne (*otpadne*) toplotne energije sa gasovitim produktima procesa topljenja, iznosi 7989,842 t<sub>eu</sub> ili 65,046 GW<sub>t</sub>h, što predstavlja 64% ukupno potrošene toplotne energije u baznom delu RTB-Bor u Boru [7].

Ostala količina toplotne 4558,839 t<sub>eu</sub> ili 37,114 GW<sub>t</sub>h je proizvedena sagorenjem uglja u parnim kotlovima Termoelektrane RTB-Bor. Od ukupno raspoložive toplotne sa proizvedenom parom 12.548,681 t<sub>eu</sub>, to jest 102,160 GW<sub>t</sub>h, 64% je utrošena za toplifikaciju poslovnog prostora, za pripremu tople potrošne vode, za proizvodnju električne energije (*proizvedena je 383.929 kW<sub>t</sub>h*) i za pokrivanje gubitaka toplotne (PTT), zatim za potrebe tehnološkog procesa u Elektrolizi (PE) 20% i za zagrevanje sekundarnog i primarnog vazduha u Topionici, za zagrevanje i tehnološke potrebe u Fabrici kiseonika i za tehnološke potrebe u pogonu za regeneraciju elektrolita (PSP) 16%, sl. 5a.

<sup>3</sup> 1,0 t ekvivalentnog uglja (eu) sadrži 29.308 MJ toplotne energije



**Sl. 5a. Potrošnja toplotne energije u 2008. godini u pogonima (TIR) u kg ekvivalentnog uglja**

PSP- Potrošnja sopstvene pare u Topionici,  
PE- Potrošnja toplotne energije u elektroliziji,  
PTT- Potrošnja toplotne energije za  
toplifikaciju i ostalo

**Sl. 5b. Producija toplotne energije u metalurgiji bakra uključujući i Termoelektranu u 2008. godini u kg ekvivalentnog uglja**

PP- Proizvodnja pare u Topionici,  
PU- Potrošnja uglja u Termoelektrani

## INDUSTRIJSKI VRELOVOD - TOPLOVODNA MREŽA BAZNOG DELA RTB-BOR

Na industrijskom vrelovodu<sup>4</sup> su povezani skoro svi industrijski pogoni baznog dela RTB-Bor lociranih u severo-istočnom delu Bora (TIR, FOD i RBN). Za snabdevanje industrijskog dela RTB-Bor toplotnom energijom u toplotnoj stanici u Termoelektrani su ugrađena tri razmenjivača toplotne snage po 14 MW<sub>t</sub>, sl. 5b. Grejni fluid je vodena para pritiska 2,0 MPa i temperature 320°C, a grejani fluid je vrela voda režima temperature 130°/80°C. Dužina industrijskog vrelovoda iznosi oko 2.030 m, odnosno sa povratnom granom 4.060 m.

Za snabdevanje toplotnom energijom baznog dela RTB-Bor, u Termoelektrani RTB-Bor su izgrađena tri parna kotla ukupne (realne) toplotne snage 59,7 MW<sub>t</sub> i tri utilizaciona parna kotla u Topionici bakra, od kojih, sada radi samo jedan čija je instalisana snaga 17,573 MW<sub>t</sub>.

Potrošači toplotne energije priključeni na industrijskom vrelovodu imaju instalisanu toplotnu snagu 67,589 MW<sub>t</sub> i režim vrele vode 130°/80°C. Instalisana toplotna snaga potrošača za pripremu tople sanitарне vode u RTB-Bor iznosi 4,304 MW<sub>t</sub>.

Pogoni baznog dela RTB-Bor, koji su povezani na industrijskom vrelovodu, za potrebe pripreme tople potrošne vode imaju instalisanu toplotnu snagu 4.304 kW<sub>t</sub>.

<sup>4</sup> Do oktobra meseca 2003. godine Termoelektrana, koja je u sastavu RTB-Bor, je obavljala i javnu funkciju toplifikacije grada i privrede Bora, kada je po nalogu Vlade Srbije iz njenog sastava izdvojena "Toplana" Bor

## ZAKLJUČCI

Sekundarna (*otpadna*) topotna energija je prateći element proizvodnje metala i drugih materijala i ima permanentni tok, dok se proizvodi ili dok se industrijske peći budu održavale u toploem stanju. Neminovnost u racionalnom gazzdovanju energijom je korišćenje sekundarne energije, pogotovo sada kada je primarna energija sve skuplja i sve nedostajuća. Za određeni proces ona se može „smatrati“ obnovljivom. Korišćenjem sekundarne (*otpadne*) topotne energije tehnoloških procesa, kojim raspolaže Bor (*pre svega RTB-Bor Grupa*) kao specifičnost, smanjiće se potrošnja primarne energije što će doprineti, osim ekonomsko efikasnosti, i manjim zagadivanjima okoline. Sekundarna energija koja se oslobađa iz tehnoloških procesa koristila se ili ne, zagadjavaće okolinu u svakom slučaju, a s druge strane, proizvodnjom potrebne energije iz primarnih izvora, kao što je sada, dodatno se zagađuje okolina. Kod narednih sagledavanja neophodno je iznaci korelacionu zavisnost raspoložive količine energije i mogućnost njenog uspešnog korišćenja u toku godine.

Korišćenjem raspoložive visokotemperaturske sekundarne energije pirometalurškog procesa u proizvodnji bakra (*procesi: prženje, topljenje, konvertovanje i plamena rafinacija*) u RTB-Bor u Boru, za projektovane kapacitete metalurških peći, može se proizvesti 28,334 MWh električne energije na sat rada, pri odvijanju Rankine-Clausius-ovog realnog topotnog ciklusa. Sekundarnom energijom može se pokriti potreba za topotnom energijom, u letnjem periodu, u Boru (*oko 10 MW<sub>e</sub> ili pare 12,85 t/h*), a ostala količina topote (*oko 88 MW<sub>e</sub>*) za proizvodnju električne energije. Za ovu svrhu mogu se koristiti parna turbina sa protivpritiskom ili kondenzaciona parna turbina sa oduzimanjem pare. U tom slučaju proizvodila bi se električna energija i topotna energija za potrebe zagrevanja elektrolita, priprema tople potrošne vode i slično. Ova konstatacija posebno je bitna kod usvajanja termoenergetske šeme topotnog ciklusa u eventualnoj gradnji nove topionice (*koja je neminovnost*) sa novom savremenijom tehnologijom proizvodnje bakra.

Na osnovu neobjavljenih istraživanja autora ovoga rada, u 2008. poslovnoj godini sa povećanjem stepena korišćenja sekundarne topotne energije procesa proizvodnje bakra kojom bi se smanjila potrošnja primarne energije smanjila bi se, pri tome, emisija gasova staklene bašte: ugljendioksida  $2,933 \text{ t}_{CO_2} / t_{eu}$ , sumpordioksida  $0,014 \text{ kg}_{SO_2} / t_{eu}$  i azota  $8,163 \text{ kg}_{N_2} / t_{eu}$ . Zamenom potrošnje električne energije iz sistema EPS-a sa električnom energijom proizvedene iz sekundarne (*otpadne*) topotne energije smanjiće se emisija gasova staklene bašte za ugljendioksid  $0,925 \text{ kg}_{CO_2} / kW_e h$ , sumpordioksid  $0,004 \text{ kg}_{SO_2} / kW_e h$  i azot

$2,514 \text{ kg}_{N_2} / \text{kW}_e \text{h}$ . S druge strane, proizvodnjom električne energije iz sekundarne (*otpadne*) toplotne energije smanjiće se emisija gasova staklene bašte za ekvivalent njihove emisije u termoelektranama Srbije za: ugljjenioksida  $1,314 \text{ kg}_{CO_2} / \text{kW}_e \text{h}$ , sumpordioksida  $0,006 \text{ kg}_{SO_2} / \text{kW}_e \text{h}$  i azota  $3,571 \text{ kg}_{N_2} / \text{kW}_e \text{h}$ .

U perspektivi, u Topionici bakra RTB-Bor u Boru, treba da se ozbiljno analizira korišćenje sekundarne (*otpadne*) toplotne energije gasovitih produkata procesa prženja, konvertovanja i plamene rafinacije, šljake plamene peći i anodnog bakra, zatim kondenzata pare i rashladne vode i vazduha nakon hlađenja agregata i uređaja.

Tehničke mogućnosti korišćenja navedene sekundarne (*otpadne*) toplotne energije mogu se tražiti u korišćenju utilizacionih parnih kotlova, razmenjivača toplote, termosifona, toplotnih cevi, toplotnih pumpi i slično. Ovde se javlja problem korišćenja niskotemperaturske sekundarne (*otpadne*) toplotne energije u periodu kada ne radi toplifikacioni sistem (*maj-septembar*).

Generalno, procena je da će, s obzirom na smanjenja rezerve neobnovljivih izvora energije, sve skuplje energije, problema klimatskih promena i nivo razvoja naučno-tehničke svesti i mogućnosti, sve analize pokazati opravdanost korišćenja sekundarne (*otpadne*) toplotne energije ne samo u metalurgiji bakra već i kod svih tehnoloških procesa.

## LITERATURA

- [1] M. Mitovski, *Supstitucija primarne energije sekundarnom u toplifikacionim sistemima*, Monografija-Centralizovani sistemi snabdevanja energijom, str. 52-58, SMEITS, Beograd, 1995.
- [2] M. Mitovski, *Iskorišćenje sekundarne energije u metalurgiji bakra*, *Procesna tehnika* br. 3-4/1996, str. 50-54.
- [3] M. Mitovski, M. Ćirković, *Energija u metalurgiji bakra*, Institut za bakar, Bor, 2007.
- [4] N. O. Bagrov, *Energetika osnovnih proizvodstv cvetnoi metallurgii*, Metallurgizdat, Moskva, 1979.
- [5] L. Z. Berlin, *Ratsionalnoe ispolzovanie vtorichnykh energoresursov tsvetnoy metallurgii*, Metallurgizdat, Moskva, 1972.
- [6] M. Mitovski, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [7] M. Mitovski, *Energetska efikasnost pogona TIR-a u 2008. god.*

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 662.613:628.477(045)=861

### **STRUČNI RAD**

*Oblast: Sekundarne sirovine*

### **FIZIČKO-HEMIJSKA KARAKTERIZACIJA PEPELA SA DEONIJE U MEDOŠEVCU U CILJU MOGUĆE PRIMENE U CEMENTNOJ INDUSTRIJI**

### **PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ASH FROM LANDFILL IN MEDOŠEVAC WITH POSSIBILITY USE IN CEMENT INDUSTRY**

Ljubiša Obradović<sup>1</sup>, Daniela Urošević<sup>1</sup>, Vojka Gardić<sup>1</sup>, Gavrilo Tomić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru

<sup>2</sup>Kolubara-Prerada, Lazarevac

### **Izvod**

*U svrhu primene pepela sa deponije u Medoševcu, koja se nalazi u okviru PD "Kolubara-Prerada" Vreoci, prvenstveno u proizvodnji cementa i građevinarstvu, izvršena je fizičko-hemijska karakterizacija, na formiranim reprezentativnim uzorcima pepela. S obzirom na svoj hemijski sastav, pepeo može naći primenu kao sastojak u proizvodnji betona i u putogradnji kao nasipni materijal. Imajući u vidu da je pepeo produkt sagorevanja uglja pri proizvodnji električne energije, po osnovu svojih fizičko-hemijskih karakteristika kategorisan kao opasan otpad, može se ponovo iskoristiti kao sekundarna sirovina, čime bi se smanjio njegov štetan uticaj na životnu sredinu i okolinu. U radu su prikazani rezultati fizičko-hemijske karakterizacije dvanaest uzoraka pepela: određivanje vlage u uzorcima, nasipne mase, specifične gustine, pH vrednosti pepela, granulometrijski sastav pepela i hemijski sastav. Dat je uporedni hemijski sastav pepela iz Medoševca i hemijski sastav pepela koji se primenjuje kao supstituent u građevinskoj i cementnoj industriji.*

**Ključne reči:** fizičko-hemijska karakterizacija, leteći pepeo, primena pepela u industriji

### **Abstract**

*The samples of fly ashes from the landfill in Medoševac, which located in the PD "Kolubara-processing" Vreoci, are tested. Potential use of disposed fly ashes from the landfill in construction and cement industry are studied in this research. In the process of production of electricity, the fly ash is a product of coal combustion. Based on its physical and chemical characteristics, the fly ash is categorized as hazardous waste with possibility of its recycling. Used of fly ash as*

---

<sup>1</sup>E-mail: daniela.urosevic@irmbor.co.rs

*secondary raw materials is the path to reducing its harmful impact on the environment. This paper presents the results of physical-chemical characterization of twelve samples of the ashes: the determination of moisture in the samples, specific density, pH values of ash, ash sieving composition and chemical composition. Also, comparison between the chemical composition of ash from Medoševac and chemical composition of ash that is already used as substituent in the construction and cement industry are shown.*

**Key words:** physical-chemical characterization, fly ash, used of ash in the industry

## UVOD

Elektofilterski pepeo, kao sekundarni materijal, tj. nus proizvod sagorevanja uglja iz Toplane u Vreocima Kolubara-Prerada, koja je sastavni deo RB Kolubara, Odlaže se na deponiji u Medoševcu, lociranoj takođe u okviru preduzeća Kolubara, blizu površinskog kopa Polje "D".

Sagorevanjem oko 220.000 tona uglja godišnje u toplani, produkuje se prosečno oko 28.820 tona pepela, za koji je na godišnjem nivou potrebno oko 40.000 m<sup>3</sup> akumulacionog prostora.

Proizvedena količina pepela, transportuje se hidrauličnim sistemom do deponije – taložnika – kaseta u Medoševcu.

S obzirom na gore navedenu količinu pepela koja se generiše na godišnjem nivou, jasno je da ova vrsta otpada ima značajan negativan uticaj na životnu okolinu, na zdravlje stanovništva, floru i faunu. Prema sistemu klasifikacije otpada u Republici Srbiji, pepeo iz termoenergetskih objekata je kategorisan kao opasan otpad, indeksnog broja iz kataloga otpada 100101/190205/190299.

S tim u vezi, treba sagledati mogućnost njegove ponovne upotrebe, imajući u vidu da je on veoma prisutan u proizvodnji cementa, građevinskih elemenata, itd.

## FIZIČKA KARAKTERIZACIJA PEPELA

U okviru fizičke karakterizacije pepela i šljake iz kasete-deponije u Medoševcu izvršena su sledeća ispitivanja [1]:

- ✓ Određivanje vlage u uzorcima;
- ✓ Određivanje nasipne mase;
- ✓ Određivanje specifične gustine;
- ✓ Određivanje pH vrednosti pepela i šljake;
- ✓ Određivanje granulometrijskog sastava pepela i šljake.

### *Određivanje vlage u uzorcima pepela*

Za određivanje vlažnosti uzorka pepela korišćena je VMK (Validna metoda kuće) - *Određivanje vlažnosti uzorka (E.b.5:2007)*.

Metoda podrazumeva određivanje grube vlage, neposredno po izuzimanju

uzoraka, sušenjem u sušnici do postizanja konstantne mase.

**Proračun:**

Sadržaj vlage se izračunava po obrascu:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \%$$

Gde je:

V- Sadržaj vlage (%)

$m_1$ - masa uzorka pre sušenja (g)

$m_2$ - masa uzorka posle sušenja (g)

Procentualni sadržaji vlage u uzorcima pepela dati su u tabeli 1.

**Tabela 1. Sadržaji vlage u uzorcima pepela**

Naziv uzorka	Vlažnost %
P1	50,41
P2	45,40
P3	46,86
P4	47,37
P5	48,93
P6	48,96
P7	48,05
P8	48,20
P9	49,83
P10	46,82
P11	51,02
P12	49,82
Psr	<b>48,47</b>

**Određivanje nasipne mase**

Za određivanje nasipne mase uzoraka pepela, korišćena je VMK (Validna metoda kuće) - *Određivanje zapremske mase uzorka i nasipne mase uzorka (E.b.11:2007)* [2].

Metoda podrazumeva određivanje mase slobodno nasutog uzorka, bez sabijanja, u sud pozname zapremine V i mase m.

**Proračun:**

Nasipna masa se izračunava po sledećem obrascu:

$$\Delta = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (\text{kg/m}^3)$$

Gde je:

- $\Delta$  - nasipna masa uzorka;
- $m_1$  - masa uzorka i suda;
- $m$  - masa suda;
- $V$  - zapremina suda.

Nasipne mase uzoraka pepela date su u Tabeli 2.

**Tabela 2.** Nasipne mase u uzorcima pepela

Naziv uzorka	Nasipna masa kg/m <sup>3</sup>
P1	0,6277
P2	0,6594
P3	0,6595
P4	0,6615
P5	0,660
P6	0,5769
P7	0,5988
P8	0,5849
P9	0,5810
P10	0,5952
P11	0,5823
P12	0,5950
Psr	<b>0,6150</b>

**Određivanje specifične gustine**

Određivanje specifične gustine pepela vršeno je u staklenom sudu - piknometru.

**Proračun**

Specifična gustina se izračunava po sledećem obrascu:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \rho_F^t \quad \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Gde je:

- $m_1$  - masa praznog piknometra, (kg)
- $m_2$  - masa piknometra sa uzorkom, (kg)
- $m_3$  - masa piknometra sa uzorkom i vodom, (kg)
- $m_4$  - masa piknometra sa vodom, (kg)
- $\rho_F^t$  - gustina fluida (vode) pri temperaturi merenja, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Specifične gustine uzoraka pepela date su u tabeli 3.

**Tabela 3. Specifične gustine uzoraka pepela**

Naziv uzorka	Specifična težina $\text{kg}/\text{m}^3$
P1	2220
P2	2270
P3	2220
P4	2250
P5	2270
P6	2380
P7	2380
P8	2370
P9	2390
P10	2380
P11	2370
P12	2370
Psr	2322,5

#### *Određivanje pH vrednosti pepela*

Za određivanje pH vrednosti uzoraka pepela korišćenja je Standardna metoda (*SRPS EN 12176 2005*).

Imajući u vidu da se radi o čvrstoj sirovini - pepelu, princip merenja pH vrednosti po ovoj metodi se sastoji u formiranju odgovarajućih vodenih suspenzija i potenciometriskom određivanju.

Rezultati izmerenih pH vrednosti su prikazani u tabeli 4.

**Tabela 4.** Izmerene pH vrednosti uzorka pepela

Naziv uzorka	pH vrednost na 25°C
P1	8,85
P2	9,14
P3	9,15
P4	8,98
P5	9,29
P6	10,09
P7	10,38
P8	10,33
P9	10,16
P10	10,18
P11	10,02
P12	9,52
<b>Psr</b>	<b>9,70</b>

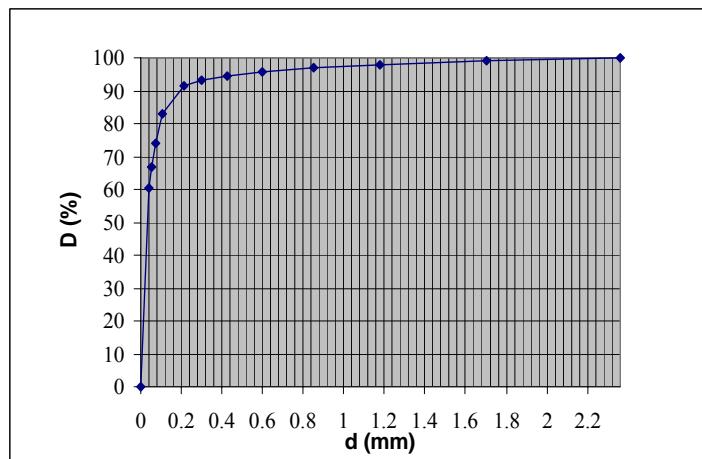
**Određivanje granulometrijskog sastava pepela**

STANDARDNOM METODOM PROSEJAVANJA, na seriji sita tipa TYLER, prečnika prosevne površine 200 mm, određivan je granulometrijski sastav, mokrim prosejavanjem.

U tabeli 5 i na slici 1, prikazan je srednji granulometrijski sastav uzorka pepela.

**Tabela 5.** Srednji granulometrijski sastav uzorka pepela

Klasa krupnoće d(mm)	Maseno učešće m(%)	Kumulativno učešće po plusu R(%)	Kumulativno učešće po minusu D(%)
-2,362+1,700	1,06	1,06	100,00
-1,700+1,180	0,99	2,05	98,94
-1,180+0,850	1,04	3,09	97,95
-0,850+0,600	1,19	4,28	96,91
-0,600+0,425	1,18	5,46	95,72
-0,425+0,300	1,15	6,61	94,54
-0,300+0,212	1,74	8,35	93,39
-0,212+0,106	8,61	16,96	91,65
-0,106+0,075	8,90	25,86	83,04
-0,075+0,053	7,25	33,11	74,14
-0,053+0,038	6,56	39,67	66,89
-0,038+0,000	60,33	100,00	60,33

**Slika 1.** Srednji granulometrijski sastav uzorka pepela

Analizom granulometrijskog sastava pepela sa deponije u Medoševcu, tabela 5, utvrđeno je da maseni sadržaj klase +0,045 mm iznosi između 33 i 39%, što je prema kriterijumima stranih standarda (ASTM C 618, EN 450-1), zadovoljavajuća finoća za primenu u cementnoj industriji.

## HEMIJSKI SASTAV PEPELA

Kompletna hemijska karakterizacija čvrstog reprezentativnog uzorka pepela sa deponije u Medoševcu, prikazana je u narednoj tabeli 6 [1].

**Tabela 6.** Hemijski sastav pepela sa deponije u Medoševcu

Elementi	Pepeo (%)	Metode
SiO <sub>2</sub>	45.48	G
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.82	AAS
CaO	8.03	AAS
MgO	2.30	AAS
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.85	AAS
K <sub>2</sub> O	1.09	AES
Na <sub>2</sub> O	0.20	AES
TiO <sub>2</sub>	0.67	ICP-AES
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.037	ICP-AES
SO <sub>3</sub>	1.25	R

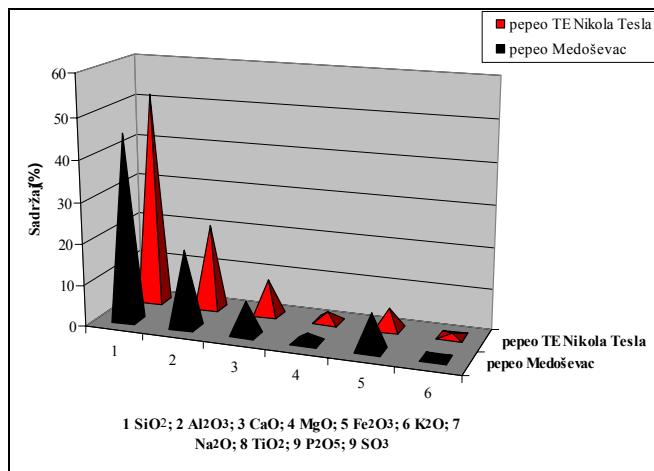
Odloženi pepeo u taložniku u Medoševcu se po načinu generisanja u pogonu Toplana, koji predstavlja termoenergetski objekat, svrstava u istu kategoriju kao i pepeo koji se uopšteno generiše na lokacijama TE „Nikola Tesla“ u Obrenovcu i „Kolubara“ u Velikim Crnjima, te je u skladu sa gore navedenim, izvršena uporedna analiza hemijskog sastava pepela sa deponije u Medoševcu i pepela iz TE Nikola Tesla-Obrenovac, koji zadovoljava sve zahteve za proizvodnju portland cementa [3].

Hemijska karakterizacija čvrstog reprezentativnog uzorka pepela iz TE „Nikola Tesla“ u Obrenovcu, koji pripada silicijumovim letećim pepelima i koji prema svom hemijskom sastavu zadovoljava standarde za proizvodnju kvalitetnog portland cementa (SRPS B.C1.018) kao i hemijski sastav portland cementa koji takođe zadovoljava zahteve standarda za kvalitet cementa (SRPS B.C1.011), prikazani su u tabeli 7 [4].

**Tabela 7.** Hemijski sastav uzoraka letećeg pepela i portland cementa

<i>Elementi</i>	<i>Leteći pepeo</i>	<i>Cement</i>
SiO <sub>2</sub>	51,76	26,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,82	7,83
CaO	8,51	56,25
MgO	2,42	1,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,14	3,68
K <sub>2</sub> O	0,94	0,806
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,165
TiO <sub>2</sub>	0,95	0,336
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,078
SO <sub>3</sub>	0,89	1,18

Grafički prikaz izvršene hemijske karakterizacije na čvstim reprezentativnim uzorcima pepela sa deponije u Medoševcu i pepela iz TE „Nikola Tesla“ u Obrenovcu, dat je na slici 2.



**Slika 2.** Grafički uporedni prikazi hemijskih sastava pepela sa deponije Medoševac i pepela iz TE „Nikola Tesla“

Uporednim sagledavanjem hemijskih sastava (tabele 6 i 7, i slika 2), po osnovu sadržaja osnovnih elemenata u pepelu koji se odlaže na deponiji u Medoševcu, koji je sličan sa satavom pepela iz TE „Nikola Tesla“, jasno ukazuju na moguću primenu istog u cementnoj industriji, za proizvodnju portland cementa. S tim u vezi, nije dovoljno zadržati se na dosadašnjim ispitivanjima, već je potrebno i izvršiti detaljnija fizičko-mehanička ispitivanja elektrofilterskog pepela.

## ZAKLJUČAK

U Republici Srbiji se godišnje proizvede preko šest miliona tona pepela a vrlo se mala količina iskoristi u građevinarstvu i cementnoj industriji.

Dosadašnja ispitivanja sprovedena na uzorcima elektrofilterskog pepela iz TE „Nikola Tesla“ pokazala su sledeća svojstva:

- Pepeo poseduje dobra pucolanska svojstva, što je od bitnog značaja za primenu u cementnoj industriji;
- Sadržaj radionuklida i teških metala je veoma nizak, skoro zanemarljiv tako da ne ugrožava prirodnu sredinu i može naći primenu u putnom građevinarstvu;
- Po osnovu ispitivanih fizičko-mehaničkih karakteristika, vrlo je povoljan materijal za izgradnju objekata u putogradnji (nasipi, ispune iza objekata, i sl.).

Prema gore iznetim konstatacijama, a imajući u vidu da se pepeo sa deponije u Medoševcu svrstava u istu kategoriju kao i pepeo koji se generiše na lokaciji TE „Nikola Tesla“ u Obrenovcu, isti može naći široku primenu u građevinarstvu i cementnoj industriji, što je veoma ekonomično i ekološki prihvatljivo rešenje, s obzirom na degradirajući uticaj koji pepeo ima na životnu sredinu.

## LITERATURA

- [1] Z. Stevanović, Lj. Obradović, R. Rajković, D. Urošević, R. Marković, Studija ispitivanja fizičko-hemijskih karakteristika pepela i šljake sa deponije u Medoševcu, Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru, decembar 2009.
- [2] Lj. Obradović, D. Urošević, G. Tomić, Fizička karakterizacija pepela i šljake sa deponije u Medoševcu, Rudarski radovi, 1(2010)57-62.
- [3] S. Cmiljanić, V. Vujanić, S. Jotić, B. Rosić, S. Tošović, P. Mitrović, Elektrofilterski pepeo iz termoelektrana „Obrenovac i Kostolac“ kao putnograđevinskog materijala, II savetovanje sa međunarodnim učešćem - Deponije pepela, šljake i jalovine u termoelektranama i rudnicima, Zbornik radova, Banja Vrujci, 20-21. oktobar 2009, s. 23-32.
- [4] I.j. Jovanović, T. Jovanović, M. Kostović, Lj. Andrić, V. Milošević, Lj. Miličić, Uticaj letećeg pepela na mehanička svojstva portland cementa, II Savetovanje sa međunarodnim učešćem, Deponije pepela, šljake i jalovine u termoelektranama i rudnicima, Zbornik radova, Banja Vrujci, 20-21. oktobar 2009, s. 229-235.

## **BAKAR 35 (2010) 2 COPPER**

---

UDK: 622.361:549.73(045)=861

### **STRUČNI RAD**

*Oblast: Priprema mineralnih sirovina*

### **POBOLJŠANJE KVALITETA PRIRODNE GLINE U PRAVCU IZDVAJANJA FINE GRANULOMETRIJSKE STRUKTURE SA POVEĆANIM SADRŽAJEM $Al_2O_3$**

### **QUALITY IMPROVEMENT OF NATURAL CLAY BY SEPARATION FROM FINE GRANULOMETRIC STRUCTURE WITH HIGH CONTENT OF $Al_2O_3$**

Daniela Urošević<sup>1</sup>, Vojka Gardić<sup>1</sup>, Saša Ivanović<sup>1</sup>, Ljubiša Mišić<sup>1</sup>,  
Miroslava Maksimović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru

### **Izvod**

*U cilju što većeg oslanjanja na domaće sirovine, što je sigurno najracionalniji pristup obezbeđenja potreba postojećih industrijskih kapaciteta, krenulo se sa laboratorijskim ispitivanjima poboljšanja kvaliteta prirodne gline, dopremljene sa lokaliteta Dušanovac, kod Negotina.*

*Imajući u vidu zastupljenost minerala gline u veoma finim frakcijama, ispod 20 mikrona, u eksperimentima se težilo ka iznalaženju mogućnosti za povećanje udela (masenih učešća) istih, odnosno povećanja sadržaja  $Al_2O_3$ , a time i dobijanja visokog kvaliteta prirodne gline, koja kao takva može naći široku primenu u svim granama industrije.*

*U cilju iznalaženja pravca kojim treba usmeriti dalja laboratorijska istraživanja i ispitivanja, u radu je izvedena kraća serija eksperimenata izdvajanja finih frakcija, metodom sedimentacije i dekantacije (taloženja).*

**Ključne reči:** glina, povećanje kvaliteta, sedimentacija i dekantacija, industrijska primena

### **Abstract**

*Experimental tests were performed with the aim of improving the quality of the natural clay from the site Dušanovac, near Negotin. Also, the aim was to provide the clay for the existing industrial needs from domestic raw materials. The quality of clay is defined chemical composition and particle size. The experiments were performed with the aim of increasing the ratio of fine clay fractions with simultaneous increase  $Al_2O_3$  content. By sedimentation method obtained the clay with the following characteristics: content of the main component,  $Al_2O_3$ , is 18.07%, content*

---

<sup>1</sup> E-mail: daniela.urosevic@irmbor.co.rs

*of  $Fe_2O_3$  is 6.98% and limits the use of clay in many industries. Further research should be conducted to find ways and technologies to increase the content of  $Al_2O_3$  over 30%, to reduce the content of  $Fe_2O_3$  to a minimum 0.6% and to reduce the content of  $CaO$  to 0.8%. This clay gets a higher utility value.  $SiO_2$  content should be maintained at current levels.*

**Keywords:** clay, increase of quality, sedimentation and decantation, use in industry

## UVOD

Gline predstavljaju kompleksnu grupu više minerala. Komercijalno su najznačajniji sledeći minerali glina:

**Kaolinit:**  $Al_2O_3 \times 2SiO_2 \times 2H_2O$

**Haloizit:**  $Al_2O_3 \times 2SiO_2 \times 2H_2O$

**Ilit:** kompleks hidratisanih silikata Al, Mg, Fe i Na

**Montmorilonit:** kompleks hidratisanih silikata Al, Mg i Na

Osnovna podela gline je na:

1. Kaolinsko-ilitske; i
2. Bentonitske gline.

Gline se najviše koriste u industriji vatrostalnog materijala, opekarskoj industriji, industriji porcelana i fine keramike, hemijskoj, farmaceutskoj industriji, za isplaku.

Kaolinitosko-ilitske gline nalaze primenu u keramičkoj industriji, industriji papira, hemijskoj industriji.

Što se tiče bentonita njegova najvažnija fizičko-hemijska svojstva su kapacitet katjonske izmene, jonska selektivnost, molekulska sorpcija, širenje i skupljanje, zadržavanje velike količine vode, visoka kohezija i adhezija, mala veličina čestica i velika specifična površina. U prirodi se najčešće javlja Ca-bentonit, što znači da je  $Ca^{++}$  ion dominantan u izmenjljivom položaju.

Na-bentonit se redi sreće u prirodi i nalazi svoju primenu:

- za povećanje plastičnosti i čvrstoće u sirovom i suvom stanju,
- pravljenja livačkih kalupa od kvarcnog peska, i
- u proizvodnji mineralnih vodenih boja; kao aditiv u proizvodnji pasta za poliranje.

## ZAHTEVI ZA KVALITETOM

Po osnovu industrijske primene glina, definisani su i zahtevi za kvalitetom, a odnose se na: mineralni sastav, sadržaj  $Al_2O_3$  i  $SiO_2$ , sadržaj nečistoća, pH vrednost, hemijska stabilnost, bubrenje, vatrootpornost, krupnoća čestica, belina.

U tabeli 1 data su osnovna i sekundarna svojstva glina koja su od značaja za industrijsku primenu istih.

**Tabela 1. Osnovna i sekundarna svojstva glina**

Osnovna svojstva	Sekundarna svojstva
Hemski sastav gline	Granulo sastav
Gustina	Adsorbcijski kapacitet gline
Tvrdoća	Nasipna gustina
Površinska svojstva	Abrazivnost
Boja	Ponašanje kod taloženja
Kvašljivost	Reološka svojstva

U zavisnosti od primene i zahteva korisnika, gline moraju da poseduju određena svojstva:

- Za proizvodnju hartije zahteva se: visok stepen beline, 80-90% klase ispod 0,002 mm, niska abrazivnost.
- U industriji boja se zahteva: visok stepen beline, veliki udeo najfinijih čestica, dobra disperziona svojstva.
- U industriji plastike zahtevi su samo u pogledu krupnoće čestica.
- Industrija keramike prvenstveno zahteva da se glina lako oblikuje.
- Industrija vatrostalnog materijala, za proizvodnju fine i grube opeke, zahteva visok sadržaj aluminijum oksida.

Po osnovu hemijskog sadržaja pojedinih elemenata, takođe postoje izvesna ograničenja u zavisnosti od namene i upotrebe odgovarajuće gline:

- Za keramičku industriju dozvoljeni sadržaji su:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do 1,5%, gubici žarenjem do 12%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  minimum 31%,  $\text{SiO}_2$  maksimum 55%, CaO najviše 1%.
- Opekarska glina i njen kvalitet nisu standardizovani, ali postoje zahtevi koje treba ispuniti, a odnose se na: temperaturu žarenja od 900-1000°C, ne sme da sadrži krupna zrna krečnjaka, gipsa, pirita.
- Kaolinske gline koje se koriste u keramičkoj industriji treba da ispunе sledeće zahteve:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  najviše 0,6-1,5%,  $\text{TiO}_2$  najviše 0,6-1,2%, CaO najviše 0,8%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  preko 30%.

## EKSPERIMENTALNI DEO

Metodom sedimentacije i dekantacije, izvršeno je izdvajanje finih frakcija ispod 20 mikrona. Ova metoda se zasniva na različitim brzinama slobodnog padanja (taloženja) čestica različite krupnoće u suspenziji, što znači da se posle

izvesnog vremena krupne čestice talože na dno menzure, a sitnije zbog manje brzine padanja, nalaziće se u suspenziji. Odlivanjem (dekantacijom) vrši se izdvajanje ovih sitnijih čestica. Postupak izdvajanja finih frakcija odlivanjem, u našem slučaju frakcije -20 mikrona, se ponavlja sve do dobijanja bistrog preliva, čime je izdvajanje završeno.

Standardnom metodom uzorkovanja u laboratoriji za pripremu mineralnih sirovina i ispitivanja, za potrebe laboratorijskih istraživanja i ispitivanja, uzet je reprezentativni uzorak žute gline, sa lokaliteta Dušanovac, oznake D4 10-11,5 m, hemijskog sastava prikazanog u tabeli 2.

**Tabela 2. Hemijski sastav uzorka žute gline D-4 10-11,5 m**

Hemijski sastav	Sadržaj (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,36
TiO <sub>2</sub>	0,84
SiO <sub>2</sub>	49,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,75
CaO	6,58

Neke od fizičkih karakteristika uzorka gline: gubitak žarenjem, vlažnost i pH vrednost žute gline dati su u tabeli 3.

**Tabela 3: Fizičko-hemijske karakteristike uzorka žute gline D-4 10-11,5m**

Gubitak žarenjem(%)	11,8
Vlažnost (%)	20
pH vrednost gline*	7,75 – nakon 0 min (potencijal -0,76 mV) 7,87 – nakon 5 min (potencijal -0,80 mV) 7,91 – nakon 35 min (potencijal -0,83 mV) 8,00 – nakon 24 h (potencijal -0,85 mV)
Temperatura pečenja °C	950

\*pH vrednost gline određena je merenjem pH vrednosti suspenzije dobijene rastvaranjem 20 g gline u 20 g vode (pH vode 7,42)

## EKSPERIMENT I

U čaši zapremine 1,5 litar napravljena je suspenzija gline i vode, čija je pH vrednost 7,78. Metodom sedimentacije i dekantacije, izvršeno je nakon 15 min taloženja, razdvajanje faza, na čvrstu, (TII)-talog, koja je nakon sušenja poslata na hemijsku analizu u ciju utvrđivanja osnovnih elemenata, datih u tabeli 4 i tečne faze (suspenzije sa finim česticama gline) koja odlazi u drugi stepen sedimentacije i dekantacije sa vremenom taloženja od 30 min.

Nakon drugog stepena sedimentacije i dekantacije, istaložena čvrsta faza (TIII), se nakon sušenja šalje na hemijsku analizu (tabela 4), dok tečna faza (suspenzija sa finim česticama gline), odlazi u treći stepen separacije i dekantacije, sa vremenom taloženja od 60 min.

Postupak se ponavlja uz izdvajanje čvrste faze (TIII) i suspenzije sa finim česticama gline koja se nakon filtriranja i sušenja šalje na hemijsku analizu. Rezultati hemijskih analiza su prikazani u tabeli 4.

**Tabela 4. Hemijski sastav faza izdvojenih metodom sedimentacije i dekantacije**

Naziv uzorka	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
	%			
<b>TI</b>	72,10	2,86	12,70	3,39
<b>TII</b>	63,62	3,49	15,47	5,16
<b>TIII</b>	63,14	4,05	14,92	4,87
<b>TFS</b>	51,88	4,99	18,07	6,98

Sadržaj frakcije -20 mikrona u fazama je sledeći:

Talog TII (**10% frakcije -20 $\mu\text{m}$** )

Talog TIII (**30% frakcije -20 $\mu\text{m}$** )

Suspenzija nakon filtriranja i sušenja TFS (**90% frakcije -20 $\mu\text{m}$** ).

Maseni udeo faza u odnosu na početnu masu uzorka gline prikazan je u tabeli 5.

**Tabela 5.** Maseni udeo faza u odnosu na početnu masu uzorka žute gline

Oznaka frakcije	Udeo frakcije u početnom uzorku gline (%)
+0,045 mm	23,22
TI	15,73
TII	11,24
TIII	3,25
TFS	46,56

Analizom ostvarenih rezultata (tabela 4 i 5), nakon trostepene sedimentacije i dekantacije, povećano je maseno učešće frakcije ispod 20 µm (46,56%), sa sadržajem glavne komponente  $\text{Al}_2\text{O}_3$  od 18,07%, što je i bio cilj. Sa druge strane povećan sadržaj  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ograničava primenu ove gline u mnogim granama industrije. S tim u vezi, dalja istraživanja treba sprovesti na iznalaženju načina i tehnologije za povećanje sadržaja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  preko 30%, smanjenje  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do minimum 0,6%, smanjenje  $\text{CaO}$  do 0,8%, čime ova gлина dobija veću upotrebnu vrednost. Sadržaj  $\text{SiO}_2$  treba održavati na sadašnjem nivou.

Glina sa postojećim hemijskim sastavom nalazi primenu u proizvodnji lonaca i kupela.

## EKSPERIMENT II

Za potrebe primene sirove gline u proizvodnji laboratorijskog posuđa (lonaca i kupela) izведен je eksperiment sa ciljem povećanja prirodne pH vrednosti gline od 7,83 do vrednosti 8,0-8,5.

Za podešavanje pH vrednosti korišćen je otpadni pepeo iz filtera „Energane“ Bor.

Prirodna pH vrednost gline iznosila je 7,83. Dodavanjem prve količine pepela od 0,2 g, pH vrednost gline dostigla je vrednost 8,0. Naknadno je dodato još 0,2 g (ukupno 0,4 g) pepela. Nakon homogenizacije dobijene suspenzije odmerena pH vrednost je iznosila 8,4.

Proračunate količine pepela potrebne po 1 kg gline za podešavanje pH vrednosti prikazane su u tabeli 6.

**Tabela 6.** Proračunata količina pepela potrebna po 1 kg gline za podešavanje pH vrednosti

Masa pepela(g)	pH vrednost	Optimalni odnos glina: pepeo
10	8,0	100 : 1
20	8,4	100 : 2

## ZAKLJUČAK

Glina sa lokaliteta "Dušanovac" prema analizi hemijskog sastava i pojedinih karakteristika glina, svrstava se u grnčarsko-opekarske gline. Sigurno je to, da ova glina ima previsok sadržaj železa i karbonata (posmatrano kroz visok sadržaj CaO) i da je pored obaveznog odstranjivanja viška železa neophodno dalje njenop opošćivanje.

Spada u gline ilitsko-smetske prirode i kao takva nije pogodna za izradu vatrostalnog posuđa za kupelaciju. Pri izradi vatrostalnog posuđa za kupelaciju od gline sa lokaliteta "Dušanovac" primetna je njena peskovitost, teško oblikovanje i mali stepen sabijanja pri presovanju, lepljenje mešavine za alat, mrka – braon boja lonaca nakon pečenja gotovog proizvoda (posledica je visokog procenta Fe) i prilična ispučalost proizvoda (usled niske vatrostalnosti i neadekvatnog hemijskog sastava gline).

Ista može naći primenu u opekarskoj industriji, uz prethodne "tretmane", smanjenja viška železa, a samim tim i povećanja glavne komponente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ili kao dodatak u spravljenju mešavina gline sa lokaliteta Dušanovac (18%) i kvalitetnih glina iz Arandelovačkog basena. Ova mešavina je korišćena za spravljanje šamotnih lonaca za topljenje i kupelaciju srednjeg kvaliteta. Tačnije na 1t mešavine za izradu šamotnog vatrostalnog posuđa moguće je dodati max. 180 kg gline "Dušanovac". Sve preko ovog procenta drastično je pogoršavalo kvalitet proizvoda i dovodilo do njihovog pucanja.

Do ovog zaključka se došlo eksperimentima sprovedenim u Sektoru za laboratorijska ispitivanja, Instituta za rудarstvo i metalurgiju u Boru.

Po osnovu ostvarenih rezultata, evidentno je da su neophodna dalja i detaljna istraživanja povećanja kvaliteta gline sa lokaliteta Dušanovac. S tim u vezi započeta geološka istraživanja na navedenom lokalitetu koja su u početnoj fazi treba dovršiti, a ujedno sa tim i utvrditi optimalne tehnološke postupke oplemenjivanja gline.

## LITERATURA

- [1] Elaborat o izvršenim geološkim istraživanjima ležišta opekarsko ciglarskih glina na području sela Dušanovac kod Negotina u 2008-2009 godini, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
- [2] Izveštaj o ispitivanju uzorka gline, Institut IMS, 2009.

## UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljinjanju. Rad priložen za objavljinjanje treba da bude pripremljen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripremljeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

**Obim i font.** Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

**Naslov rada** treba da je isписан velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada pišu se imena autora i institucija u kojoj rade. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusuotu.

**Izvod** se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

**Ključne reči** se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

**Izvod i ključne reči** treba da budu date i na engleski jezik.

**Osnovni tekst.** Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

**Glavni naslovi** trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

**Podnaslovi** se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

**Slike i table.** Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slike i tabela se daju arapskim brojevima.

**Reference u tekstu** se navode u uglačastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilaže na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavje u knjizi)

[2] H. Ernst, Research Policy, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navođenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

**Zahvalnost** se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštrom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je: Časopis BAKAR

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: [nti@imb.or.rs](mailto:nti@imb.or.rs); [ana.kostov@imb.or.rs](mailto:ana.kostov@imb.or.rs)

Telefon: 030/454-254; 030/454-108

*Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.*

## INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

**COPPER Journal** is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

**Volume and Font Size.** The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

**Title of Paper** should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

**Abstract** is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

**Keywords** are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

**Abstract and Keywords** should be also given in English language.

**Basic Text.** The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

**Main Titles** should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

**Subtitles** are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

**Figures and Tables.** Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

**References in the text** are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

**Acknowledgement** is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address:      Journal COPPER  
Mining and Metallurgy Institute Bor  
35 Zeleni bulevar, 19210 Bor  
E-mail: [nti@irmbor.co.rs](mailto:nti@irmbor.co.rs) ; [ana.kostov@irmbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irmbor.co.rs)  
Telephone: +381 30/454-254; +381 30/454-108

*We are thankful for all authors on cooperation.*

**ProcessEng Engineering GmbH**  
Jörgerstraße 56-58  
A-1170 VIENNA / Austria

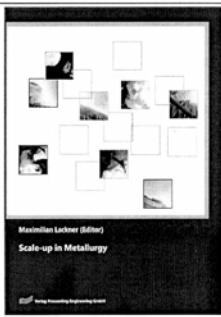
Tel./Fax: +43 1 403-04-94  
E-mail: office@processeng.at



<http://www.processeng.at>

## Scale-up in Metallurgy

- Edited by **Maximilian Lackner**
- („**Handbook of Combustion**“, Wiley VCH, 2010; „**Lasers in Chemistry**“, Wiley VCH, 2008).
- Foreword: **Johannes Schenk**
- Publisher: ProcessEng Engineering GmbH;
- Paperback
- 504 pages
- Edition: 1 (May 2010)
- Language: English
- ISBN-13: 978-3-902655-10-3
- Price:** 149 Euro incl. 10% VAT and incl. shipping; 199 USD incl. 10% VAT and incl. shipping.



### About the book:

With hundreds of millions of tons/year, metal production is carried out on a large scale. With fierce competition and stringent environmental boundary conditions, it is vital to use the best possible production processes. Scale-up is the science of transferring a (novel) process from the laboratory or bench-scale to the industrial scale. This book is dedicated to scale-up in metallurgy. Steel, iron, aluminium, copper, zinc, magnesium, titanium, cadmium, noble metals, carbides and others are covered. Thereby, the book closes a gap in the current literature. Written by recognized experts from industry and academia, this book is for scientists, engineers and practitioners in all fields of metallurgy, from basic research to process development and plant and mill operation.

### Authors & chapters:

- Maximilian Lackner, Introduction
- Kamil Wichterle, Marek C. Ruzicka, Scale-up Fundamentals
- Wensheng Zhang, Scale-up of Manganese Production
- Mohammad Al-Harabsheh, Samuel Kingman, Scale-up of Microwave Leaching
- Ana Kostov, Scale-up of Pyrometallurgical Copper Production
- Chaganti RVS Nagesh, R.B.Subramanyam, Scale-up of titanium sponge production
- Carla Barbatti, Microstructure and Texture Development in Advanced High Strength Steels
- Marcelo Oliveira Silvestre, Scale-up of zinc production
- José Garcia, Wolfgang Strelsky, Process development and scale-up of cemented carbide production
- Mohammad Sadegh Safarzadeh, Scale-up of Cadmium Production
- Bina Singh, Scale-up in Noble Metal Catalyst Recovery
- Claudio Luiz Schneider, Ball mill scale-up
- Luigi A.C. De Filippis, Rossella Surace, Scale-up of Aluminium Foam Production
- Lev Filippov, Mikhail Burstein, Scale-up of Flotation Processes
- V. Sheoran, A. S. Sheoran, P. Poonia, Scale-up of Phytomining Processes
- G. S. Gupta, M.P.L. Rao, Scale-up of Carbide Production
- Maximilian Lackner, Glossary

**ProcessEng Engineering GmbH**  
Jörgerstraße 56-58  
A-1170 VIENNA / Austria

Tel./Fax: +43 1 403-04-94  
E-mail: office@processeng.at



Your Partner in high tech business

<http://www.processeng.at>

## Order Form

Please fax your order to: +43-1-40-30-494

Pieces	Book	Single Price (incl. 10% VAT)	Total
	Scale-up in Metallurgy	EUR 149,00	
	High Pressure Processes In Chemical Engineering	EUR 220,00	
	High Temperature Processes In Chemical Engineering	EUR 220,00	
	Scale-up in Combustion	EUR 149,00	
	Laser Diagnostics in Combustion	EUR 107,00	
	Alternative Ignition Systems	EUR 107,00	
	Glossary of Combustion	EUR 79,00	
	Chemical Engineering Vocabulary	EUR 55,00	
	Gas sensing in industry by TDLS	EUR 107,00	
<b>Total value of your order EUR</b>			

Name / Company: \_\_\_\_\_

Address: \_\_\_\_\_

City: \_\_\_\_\_

Zip Code: \_\_\_\_\_ Tel.: \_\_\_\_\_

Country: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_

EU customers please indicate your VAT number: \_\_\_\_\_

**Payment options:**  Mastercard     VISA

Card Number: \_\_\_\_\_

Cardholder's name: \_\_\_\_\_

Expire date: \_\_\_\_\_

Card security code: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_ Signature: \_\_\_\_\_



**SADRŽAJ****CONTENS**

B. Rajković, Z. Ilić, V. Marjanović

**PRIMENA PROGRAMA „PIPE PAK“ ZA PRORAČUN KOMPENZACIJE  
TEMPERATURSKIH DILATACIJA ZA 3-OSNI SISTEM NA KOLENU OD 90°**

APPLICATION OF SOFTWARE „PIPE PAK“ FOR CALCULATION OF  
COMPENSATION OF TEMPERATURE DILATATIONS FOR 3-AXES SYSTEM AT  
90° ELBOW ..... 1

M. Mitovski, A. Mitovski

**UTICAJ PROIZVODNJE BAKRA NA EFEKAT „STAKLENE“ BAŠTE I  
„KISELE“ KIŠE**

COPPER PRODUCTION INFLUENCE INTO EFFECTS “GREENHOUSE”  
GASES EFFECTS AND “ACID” RAINS ..... 11

E. Požega, L. Gomidželović

**TOPIONICE BAKRA SA PLAMENOM I ISASMELT PEĆI**

COPPER SMELTERS WITH REVERBATORY AND  
I SASMELT FURNACE ..... 25

E. Požega, L. Gomidželović, V. Trujić

**HSC CHEMISTRY: VISUALISING COPPER SMELTING**

HSC CHEMISTRY: VIZUALIZACIJA PROCESA TOPLJENJA BAKRA ..... 33

D. Urošević, Z. S. Marković

**ISPITIVANJE UTICAJNIH FAKTORA NA STABILNOST SUSPENZIJE  
TOPIONIČKE ŠLJAKE**

INVESTIGATION OF INFLUENCE FACTORS ON SUSPENSION STABILITY OF  
THE SMELTING SLAG ..... 41

M. Mitovski

**EFEKTI KORIŠĆENJA SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLOTE****METALURGIJE BAKRA U TOPLIFIKACIONIM SISTEMIMA**

EFFECTS OF USING OF SECONDARY (WASTE) HEAT OF  
COPPER METALLURGY IN HEATING SYSTEMS ..... 55

Lj. Obradović, D. Urošević, V. Gardić, G. Tomić

**FIZIČKO-HEMIJSKA KARAKTERIZACIJA PEPELA SA DEPONIJE U****MEDOŠEVCU U CILJU MOGUĆE PRIMENE U****CEMENTNOJ INDUSTRIJI**

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ASH FROM LANDFILL  
IN MEDOŠEVAC WITH POSSIBILITY USE IN CEMENT INDUSTRY ..... 67

D. Urošević, V. Gardić, S. Ivanović, Lj. Mišić, M. Maksimović

**POBOLJŠANJE KVALITETA PRIRODNE GLINE U PRAVCU IZDVAJANJA****FINE GRANULOMETRIJSKE STRUKTURE SA****POVEĆANIM SADRŽAJEM  $\text{Al}_2\text{O}_3$** 

QUALITY IMPROVEMENT OF NATURAL CLAY BY SEPARATION FROM FINE  
GRANULOMETRIC STRUCTURE WITH HIGH CONTENT OF  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ..... 77