

Dr Milanče MITOVSKI, dipl.inž. maš., akademik IAS

# KORIŠĆENJE SEKUNDARNE ENERGIJE TOPIONICE BAKRA U BORU

Bor, februara 2023. godine



# SADRŽAJ

<b>PREDGOVOR.....</b>	<b>3</b>
<b>SPISAK VELIČINA I OZNAKA .....</b>	<b>4</b>
<b>UVOD.....</b>	<b>6</b>
<b>1.0. PREGLED PROIZVODNJE BAKRA I KORIŠĆENJE SEKUNDARNE ENERGIJE U BORU.....</b>	<b>7</b>
<b>2.0. ISKORIŠĆENJE ENERGIJE U PROIZVODNJI ANODNOG BAKRA U TOPIONICI U BORU DO 2014. GODINE .....</b>	<b>9</b>
<b>3.0. UVOĐENJE OUTOKUMPU FLASH SMELTING PROCES U BORU .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. SEKUNDARNA ENERGIJA PROCESA TOPLJENJA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. PROIZVODNJA PARE U UTILIZACIONOM PARNOM KOTLU U BORU ...</b>	<b>21</b>
<b>3.3. ISKORIŠĆENJE PROIZVEDENE SUVOZASIĆENE PARE U BORU.....</b>	<b>23</b>
<b>4.0. IZBOR TOPLOTNOG CIKLUSA ZA ISKORIŠĆENJE SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLOTNE ENERGIJE FLASH PEĆI.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. ISKORIŠĆENJE SUVOZASIĆENE PARE PRITISKA 6,0 MPa I TEMPERATURE NAPOJNE VODE 140°C U KONDENZACIONOJ PARNOJ TURBINI.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.1. SNAGA I EFIKASNOST PARNE .....</b>	<b>34</b>
<b>5.0. PROIZVODNJA TOPLOTNE I ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1. Proizvodnja električne energije u toku trajanja grejne sezone .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2. Proizvodnja toplotne energije u toku trajanja grejne sezone .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3. Proizvodnja električne energije van trajanja grejne sezone .....</b>	<b>40</b>
<b>5.4. Proizvodnja toplotne energije van trajanja grejne sezone.....</b>	<b>40</b>
<b>5.5. Ukupna godišnja proizvodnja električne i toplotne energije .....</b>	<b>40</b>
<b>6.0. CENA PROIZVODA TERMOENERGETSKOG SISTEMA TOPIONICE NAKON MODERNIZACIJE U BORU .....</b>	<b>42</b>
<b>7.0. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>45</b>
<b>8.0. POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE.....</b>	<b>48</b>
<b>8.1. POSTOJEĆI POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE, STANJE 2015. GODINE ...</b>	<b>48</b>
<b>8.2. POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE NAKON MODERNIZACIJE TOPIONICE .....</b>	<b>49</b>
<b>8.3. Raspoloživa termoenergetska oprema u Termoelektrani RTB-Bor .....</b>	<b>54</b>
<b>9.0. POTROŠNJA ENERGENATA U TOPIONICI BAKRA NAKON MODERNIZACIJE .....</b>	<b>55</b>
<b>10.0 PREDLOG KORIŠĆENJA SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLOTE PEIRCE SMITH KONVERTORA .....</b>	<b>56</b>
<b>11.0 REZIME .....</b>	<b>57</b>
<b>12.0. LITERATURA.....</b>	<b>60</b>

## PREDGOVOR

Nakon dugogodišnjih analiza i spremanja zamene već zastarele tehnologije prženja šarže bakra u fluosolid reaktorima i topljenje prženca u plamenim pećima u topionici u Boru, odlučili nadležni, pored novijih tehnologija, da se uvede Flash Smelting Proces topljenja bakronosne šarže, mada postoje modernije tehnologije topljenja od ove koja potiče iz 1949. godine. Umesto da odlučuje tehnika, odlučivala je ipak politika.

Projekat Modernizacije topionice bakra (Modernization of Existing Copper Smelter) i izgradnje fabrike za proizvodnju sumporne kiseline (New Sulphuric Acid Plant), koji je realizovan (prema Ugovoru između SNC Lavalin i RTB-Bor je potpisan 10. VI 2010. godine) i puštena u pogon 4. marta 2015. godine. Projekat je obuhvatio uvođenje novog procesa topljenja koncentrata bakra (Flash Smelting Proces), prevođenje procesa proizvodnje sumporne kiseline na proces sa duplom katalizom i duplom adsorpcijom.

Iz navedenih procesa dobija se sekundarna (otpadna) toplotna energija:

- iz procesa topljenja koncentrata bakra dobija se visokotemperaturska sekundarna toplota sa gasovitim produktima i poletinom. Gasoviti produkti i poletina ohlade se sa 1270°C na 350°C u utilizacionom parnom kotlu;

- iz procesa proizvodnje sumporne kiseline dobija se sekundarna toplotna energija. Predmet analize ne obuhvata iznalaženje mogućnosti korišćenja sekundarne toplotne energije iz procesa proizvodnje sumporne kiseline, jer se ona koristi za potrebe sušionice.

Sekundarna toplotna energija, koja će se dobiti iz procesa topljenja koncentrata, treba da se maksimalno iskoristi:

1. Visokotemperaturska toplota za tehnološke potrebe (postrojenje za razdvajanje vazduha, sušenje koncentrata, zagrevanje mazuta, regeneracija elektrolita i drugo), za proizvodnju toplotne i električne energije. Za ovu svrhu potrebno je izabrati savremena rešenja toplotnog procesa i opreme, pri tome, da ona budu kompatibilna sa postojećim stanjem termoenergetskog sistema TIR-a.

2. Za niskotemperatursku sekundarnu energiju ispitati mogućnost njenog korišćenja za potrebe sušenja šarže, zagrevanja elektrolita, toplifikacione svrhe i pripreme tople potrošne vode. Ovde nije isključena mogućnost i podizanja temperaturnog nivoa primenom toplotne pumpe, kako bi se omogućilo šire mogućnosti primene niskotemperaturske toplote.

Kod svih analiza treba se obrati pažnja da je u "zimskom" periodu (oktobar-april) veća potreba za toplifikaciju u odnosu na "letnji" period (april-oktobar) kada ne radi toplifikacija prostora. U svim razmatranjima, s obzirom na mogućih zastoja metalurških agregata, predvideti rezervne izvore toplifikacije objekata.

S obzirom na nedostatku fosilnih goriva, problema globalnog zagrevanja Zemlje i cene energije iznaći mogućnost, kod projektovanja i realizacije projekta izgradnje nove linije topljenja i proizvodnje sumporne kiseline, maksimalno korišćenje sekundarne (otpadne) toplote procesa za pokrivanje potrebe tehnologije za toplotom, a ostalo koristiti za proizvodnju električne energije, a uspeh toga zavisi od godišnjeg doba, razumevanja menadžmenta Preduzeća i potrebe. Energija iz procesa nema opravdanje bacati u okolinu, a priori!

## SPISAK VELIČINA I OZNAKA

Oznaka	Mera	Značenje
$b_i$	-	Koeficijent raspodele troškova
$V_{Gw}, V_{Gw}$	$m_n^3/h, m_n^3/s$	Količina vlažnih gasovitih produkata
$v_{Gw}^*$	$m_n^3/kWh$	Specifična količina gasovitih produkata
$D$	t/h	Produkcija pare u utilizacionom parnom kotlu
$d_s$	kg/s	Produkcija pare u utilizacionom parnom kotlu
$e$	kWh/kWh, kJ/kg	Eksergija proizvoda u kombinovanoj proizvodnji
$E$	kW <sub>e</sub> h/a	Godišnja proizvodnja električne energije
$i$	kJ/kg	Entalpija
$i_{Gw}$	kJ/m <sup>3</sup>	Specifična entalpija gasovitih produkata
$i''$	kJ/kg	Entalpija suvozasicene pare
$i_w$	kJ/kg	Entalpija kotlovske (napojne) vode
$l_{Gb}$	kJ/kg	Specifični rad generatora
$l_{ePT}$	kJ/kg	Efektivni specifični tehnički rad
$l_{iPT}$	kJ/kg	Specifični izentropski tehnički rad
$l_k$	kJ/kg	Koristan tehnički rad
$l_{uPT}$	kJ/kg	Stvarni specifični tehnički rad
$m$	kg/kg	Učešće mase dela pare u 1 kg mase sveže pare
$m'$	kg/s	Protok dela pare
$m_{mazuta}$	kg/h	Potrošnja mazuta za pregrevanje pare
$m_n^3$	$m_n^3$	Normalni uslovi ( 0°C i 1,01325 bar)
$m_{sp}$	kg/s	Protok sveža para
$N$	-	Broj dana rada termoenergetskog sistema u godini
$N_{Gb}$	kW	Snage na priključcima elektro generatora
$N_{ePT}$	kW	Efektivna snaga parne turbine
$n_{iPT}$	kWh/kg sveže pare	Izentropska specifična snaga parne turbine
$N_{iPT}$	kW	Izentropska snaga parne turbine
$N_{PTP}$	kW <sub>t</sub>	Angažovana snaga potrošača tehnološke pare
$p$	MPa, kPa, bar	Pritisak pare
$Q$	kW <sub>h</sub> /a	Godišnja proizvodnja toplotne energije
$q_d, q_o$	kJ/kg sveže pare	Dvedena i odvedena toplota
$q_{PBb}$	kJ/kWh	Specifična potrošnja toplote u parnom bloku
$q_{PTb}$	kJ/kWh	Specifična potrošnja toplote paroturbinskog postrojenja bruto
$q_{PTbKP}^I$	$\frac{kJ}{kW_e h + kW_t h}$	Specifična potrošnja toplotne energije paroturbinskog postrojenja bruto kombinovane proizvodnje
$\Delta Q$	kW <sub>t</sub>	Raspoloživa količina toplote u utilizacionom parnom kotlu
$Q_{hr}$	kW <sub>t</sub>	Toplota iz hemijskih reakcija u utilizacionom parnom kotlu
$Q_{pl}$	kW <sub>t</sub>	Toplota poletine
$t$	°C	Temperatura
$T_r$	RSD, USD	Troškovi rada termoenergetskog sistema topionice
$H_{dw}$	kJ/kg	Donja toplotna moć mazuta i uglja
$x$	kg <sub>pare</sub> /kg <sub>vlažne pare</sub>	Stepen suvoće pare ( $x \leq 1,0$ )
$c_i, c_{pi}$	USD/kW <sub>e</sub> h, USD/MW <sub>h</sub>	Proizvodna cena električne i toplotne energije u Topionici
$c_p$	kJ/(kg·K)	Srednja specifična toplota mazuta
$C_{pare}$	RSD/t, USD/t	Proizvodna cena pare
$c_{pm}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Specifična toplota gasovitih produkata
$\eta_G$	-	Stepen korisnosti elektro generatora
$\eta_{iPT}$	-	Izentropski stepen korisnosti parne turbine
$\eta_{mPT}$	-	Mehanički stepen korisnosti parne turbine

$\eta_{PBb}$	-	Stepen korisnosti parnog bloka
$\eta_{PBbkp}^I$	-	Stepen korisnosti parnog bloka sa kombinovanom proizvodnjom
$\eta_{RZ}$	-	Stepen korisnosti rekuperativnih zagrejača
$\eta_{TA}$	-	Stepen korisnosti turboagregata
$\eta_t$	-	Termodinamički stepen korisnosti R-C toplotnog ciklusa, bruto
$\eta_{UPK}$	-	Stepen korisnosti ulizacionog parnog kotla
$\rho_{Gw}$	$\text{kg/m}_n^3$	Gustoća vlažnih gasovitih produkata procesa
$\tau$	h/d	Broj radnih sati na dan

## U V O D

Zamena plamenopečnog procesa topljenja koncentrata bakra sa topljenjem Flash Smelting Proces, prilagođavanja ostalih delova Topionice toj svrsi, kao i izgradnje fabrike za proizvodnju sumporne kiseline i poštovanje strogih ekoloških zahteva za očuvanje životne sredine u Boru i okolini. Za zamenu tehnologije topljenja koncentrata bakra u topionici RTB-Bor, na osnovu [1], predviđeni su sledeći parametri:

Topljenje koncentrata bakra 400.000 t/a,  
Kapacitet topljenja u FSF 51,6 t/h suvog koncentrata ili 60,6 t/h šarže (Total Feed),  
Sadržaj bakra u koncentratu 20,79% mase,  
Granulometrijski sastav koncentrata: niže od 200 $\mu$ m 90÷100% i više od 200  $\mu$ m 0÷10% [17],  
Zapreminska masa koncentrata 2,1 t/m<sup>3</sup> i specifična masa 3,5 t/m<sup>3</sup> [17],  
Sadržaj bakra u bakrencu 62%,  
Vlažnost koncentrata 10%,  
Sadržaj kiseonika u vazduhu 38,4% O<sub>2</sub>,  
Proizvodnja katodnog bakra 80.000 t/a,  
Stepen tehnološkog iskorišćenja bakra 98% i sumpora ne niže od 98%,  
Proizvodnja bakra godišnje 330 dana po 24 h/d,

Uvođenjem autogeno topljenje koncentrata bakra Outokumpu Flash Smelting Furnace, iz Flash Smelting Furnace (FSF) peći za topljenje izlaze u proseku 35.920 m<sup>3</sup> /h (to jest 9,978 m<sup>3</sup> /s) gasova zapreminskog sastava: 29,00% SO<sub>2</sub>, 0,0% SO<sub>3</sub>, 1,6% H<sub>2</sub>O, 0,7% CO<sub>2</sub>, 66,1% N<sub>2</sub> i 2,6% O<sub>2</sub> [1]. Temperatura gasova na izlazu iz peći za topljenje je maksimalna 1274°C. Sa gasovima odlazi i 69 g/m<sup>3</sup> poletine. Za hlađenje gasova na temperaturi od 350°C izgrađen je utilizacioni parni kotao, koji proizvodi suvozasićenu vodenu paru pritiska 60 bar(a) za koji odgovara temperatura suvozasićene pare (stepen suvoće x=1,0 kg/kg) 275,56°C [3].

Količina gasovitih produkata na izlazu iz utilizacionog parnog kotla (Waste Heat Boiler- WHB) iznosi 38.810 m<sup>3</sup> /h (to jest 10,781 m<sup>3</sup> /s) sastava (*kojeg je preračunao dr M. Mitovski na osnovu [1]*): 25,80% SO<sub>2</sub>, 0,53% SO<sub>3</sub>, 1,80% H<sub>2</sub>O, 0,64% CO<sub>2</sub>, 68,01% N<sub>2</sub> i 3,50% O<sub>2</sub> i zaprašenost 57 g/m<sup>3</sup> .

Na osnovu [15] i na osnovu parametara proizvedene pare u proizvodnji sumporne kiseline (14,096 t/h suvozasićene pare pritiska 21 bar-n) i potrebne toplote za sušenje šarže (10,6 t/h), treba usvojiti korišćenje pare iz fabrike sumporne kiseline za potrebe sušare šarže u topionici bakra, pri tome ostaje kao višak dela te pare, koja može da se koristiti za toplifikacione svrhe.

Proizvedena para u utilizacionom parnom kotlu Flash Smelting Furnace koristi se za zagrevanje elektrolita, priprema tople potrošne vode, za toplifikacione svrhe, a od redukcije pritiska pare sa 6,0 na 2,0 MPa može da se proizvodi električna energija u kondenzacionom paroturbinskom bloku. (prema [1 i 15] predviđena je sledeća produkcija suvozasićene pare pritiska 6,0 MPa, u t/h: hight blend 27,5, low blend 27,5 i nominal blend 25,8 t/h).

S obzirom da proizvedena vodena para u proizvodnji sumporne kiseline po kvalitetu i kvantitetu zadovoljava, u potpunosti, potrebe sušenja šarže [1, 15], proizvedena toplota FSF može da se koristi za potrebe toplifikacije prostora, zagrevanje elektrolita i za pripremu tople potrošne vode u baznom delu kombinat bakra, a od preostale količine pare može da se proizvodi električna energija. Treba napomenuti da preostala toplota iz procesa: topljenja, sekundarna toplota konvertovanja, granulacije šljake, hlađenja anodnog bakra i rashladne vode može se koristiti za potrebe toplifikacije, kroz direktne razmene toplote ili indirektno primenom toplotnih pumpi.

## 1.0. PREGLED PROIZVODNJE BAKRA I KORIŠĆENJE SEKUNDARNE ENERGIJE U BORU

Nakon dugih ispitivanja i dogovora rudarstvo u Boru kreće 1903. godine jamskom eksploatacijom bakarne rude, a metalurgija bakra počinje proizvodnju 1906. godine. U procesu metalurške proizvodnje bakra koristile se za topljenje vater žaketne (VJ) peći, konvertori i anodne peći, a trošio se koks, električna energija, tečno gorivo i rashladna voda, a tek 1938. godine počela je sa radom pogon elektrolitičke rafinacije za proizvodnju katodnog bakra i zlata.

*Parametri utilizacionih parnih kotlova u topionici u Boru*

TABELA 1.

PARAMETAR	UTILIZACIONI PARNI KOTAO	
	UK-1	UK-3 ili UK-4
1. Grejna površina kotla, m <sup>2</sup>	972	487
2. Grejna površina pregrejača pare, m <sup>2</sup>	388	252
3. Grejna površina zagrejača vazduha, m <sup>2</sup>	2.826	571
4. Radni pritisak, bar	44	42
5. Temperatura napojne vode, °C	180	180
6. Temperatura pregrejane pare, °C	440	440
7. Maksimalna proizvodnja pare, t/h	24,95	15,50
8. Normalna proizvodnja pare, t/h	11,10	12,40
9. Maksimalna temperatura gasova na ulazu, °C	1.350	1.325
10. Temperatura gasova ispred pregrejača pare pri D <sub>IN</sub> i D <sub>IM</sub> , °C	613/852	740/855
11. Temperatura gasova ispred zagrejača vazduha pri D <sub>IN</sub> i D <sub>IM</sub> , °C	392/550	485/580
12. Temperatura gasova iza zagrejača vazduha pri D <sub>IN</sub> i D <sub>IM</sub> , °C	210/280	325/375
13. Temperatura vazduha ispred parnog predgrejača, °C		20
Temperatura vazduha iza parnog predgrejača, °C		180
Temperatura vazduha iza cevnog zagrejača (luvo), °C		400/425
14. Količina gasova, m <sup>3</sup> /h:		
a) pri maksimalnoj proizvodnji D <sub>IM</sub>	60.000	31.700
b) pri normalnoj proizvodnji D <sub>IN</sub>	24.000	22.615
15. Količina vazduha, m <sup>3</sup> /h:		
a) pri maksimalnoj proizvodnji D <sub>IM</sub>	32.000	27.400
b) pri normalnoj proizvodnji D <sub>IN</sub>	15.300	19.600
16. Toplotno opterećenje kotla, kW/m <sup>2</sup>	61,41	38,35/40,70
17. Instalirana toplotna snaga parnog kotla neto, MW <sub>t</sub>	17,573	10,949
18. Proizvođač opreme	Babcock Oberhausen	Babcock Smulders
19. Fabrički broj	10060	2714/2715
20. Godina gradnje	1960.	1971.

Promena tehnologije proizvodnje anodnog bakra izvršene 1961. godine obuhvata puštanje u pogon pet pržne peći (a kasnije je ugrađen fluo solid reaktor broj 1 za prženje šarže kao zamena pržnih peći), plamena peć (pogonski broj 1), ložene prahom kamenih ugljeva, tri konvertora, dve anodne peći i dve livne mašine za livenje anodnog bakra i fabrike sumporne kiseline sistema Turm. U vremenu puštanja plamene peći broj 1 u pogon bila je zastarela tehnologija plamenopećnog topljenja prženca. Gasoviti produkti plamene peći hladili se u utilizacionom parnom kotlu (UK-1) grejne površine 972 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 388 m<sup>2</sup> i zagrejača sekundarnog vazduha 2826 m<sup>2</sup>. Utilizacioni parni kotao, koji služio za hlađenje gasovitih produkata sa max 1350°C na 210-280°C na izlazu iz zagrejača sekundarnog vazduha. Utilizacioni parni kotao iza plamene peći broj 1 imao kapacitet produkcije pare max 24,95 t/h pregrejane vodene pare pritiska 44 bar temperature 440°C. Utilizacioni parni kotao se napajao kotlovskom vodom temperature 180°C i pritiska 55 bar, tab. 1.



Za hlađenje konvertorskih gasova ugrađen je 1960. godine utilizacioni parni kotao (UK-2) grejne površine 1470 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 274 m<sup>2</sup>. Ovaj utilizacioni parni kotao služio za hlađenje gasovitih produkata sa 500°C do tačke rose. Utilizacioni parni kotao iza konvertora (UK-2) imao kapacitet produkcije pare max 11,75 t/h pregrejane vodene pare pritiska 44 bar temperature 400°C. Utilizacioni parni kotao se napajao kotlovskom vodom temperature 180°C i pritiska 55 bar. Ovaj utilizacioni parni kotao osim konvertorskih gasova, jedan period je služio za hlađenje i gasova fluo solid reaktora broja 1. Ovaj parni kotao je van pogona od kraja 1979. godine, a konvertorski gasovi se, nakon toga, hladili u naknadno ugrađenoj rashladnoj komori.

Godine 1971. godine izgrađena je plamena peć broj 2 ložene mazutom u kojoj se topio prženac iz fluo solid reaktora broj 2. Za hlađenje gasovitih produkata plamene peći broj 2 montirana su dva utilizaciona parna kotla (UK-3 i 4) grejne površine po 487 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 252 m<sup>2</sup> i zagrejača vazduha 571 m<sup>2</sup>. Utilizacioni parni kotlovi UK-3 i 4, koji služe za hlađenje gasovitih produkata plamene peći broja 2, sa max 1325°C na 325-375°C na izlazu iz zagrejača vazduha. Utilizacioni parni kotlovi iza plamene peći broj 2 imaju kapacitet produkcije pare max po 15,5 t/h pregrejane vodene pare pritiska 42 bar temperature 440°C. Utilizacioni parni kotlovi UPK- 3 i 4 se napajaju kotlovskom vodom temperature 180°C i pritiska 55 bar.

Proizvedena para u utilizacionim parnim kotlovima u topionici bakra koristila se za tehnološke potrebe u topionici, elektrolizi, za grejanje industrijskog dela RTB Bor i grada Bora u toku grejnoj sezoni, a van nje koristila se za proizvodnju električne energije u tadašnjoj Termoelektrani, koja je funkcionisala u sastavu RTB Bor Kompanije.

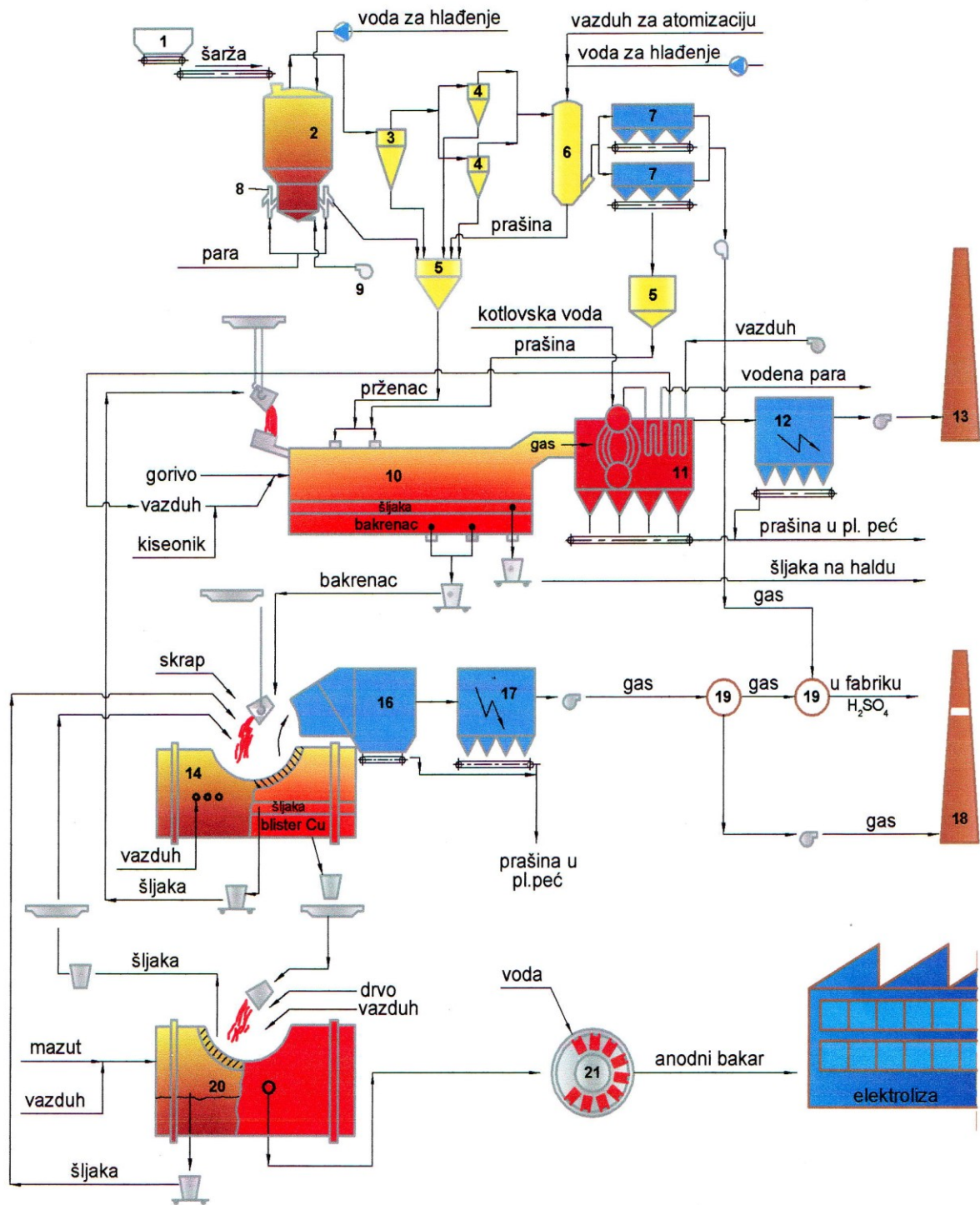
## 2.0. ISKORIŠĆENJE ENERGIJE U PROIZVODNJI ANODNOG BAKRA U TOPIONICI U BORU DO 2015. GODINE

Proces pirometalurške proizvodnje anodnog bakra je proces sa intenzivnom razmenom mase i energije. Ulazne i izlazne procesne komponente sadrže veliku količinu hemijske i fizičke energije koja se delimično koristi u procesu, a deo ostaje neiskorišćena. Sa tog aspekta, pirometalurški proces proizvodnje anodnog bakra daje realne mogućnosti da se optimizacijom energetske i materijalne faktora procesa ostvare značajni efekti koji mogu biti od velikog uticaja na ukupan tehnološki proces, na njegovu ekonomičnost i očuvanje radne i životne sredine. Za odvijanje pirometalurškog procesa troši se velika količina energije (*gorivo, električna energija, vazduh, voda i ekvivalent energije procesnih materijala*), u iznosu od 22,50÷23,70 GJ/t anodnog bakra ili 770÷800 kg uslovnog goriva za 1t anodnog bakra. Od ove količine, potrošnja električne energije iznosi 430÷700 kWh/t anodnog bakra (*u vreme sankcija, u proseku, 1.157 kWh/t anodnog bakra*). Tehnološka šema proizvodnje anodnog bakra, u topionici bakra RTB-Bor u Boru, je prikazana na sl. 1.

Iz procesnog prostora peći se odvodi značajna količina energije (fizička energija proizvoda, "gubitak" toplote u okolini i slično), a ona iznosi oko 125 MW<sub>t</sub>. Deo te količine toplotne energije predstavlja nepresušni izvor za proizvodnju toplotne i električne energije, toplote za sušenje uglja i šarže i za potrebe toplifikacije i tehnološke potrebe.

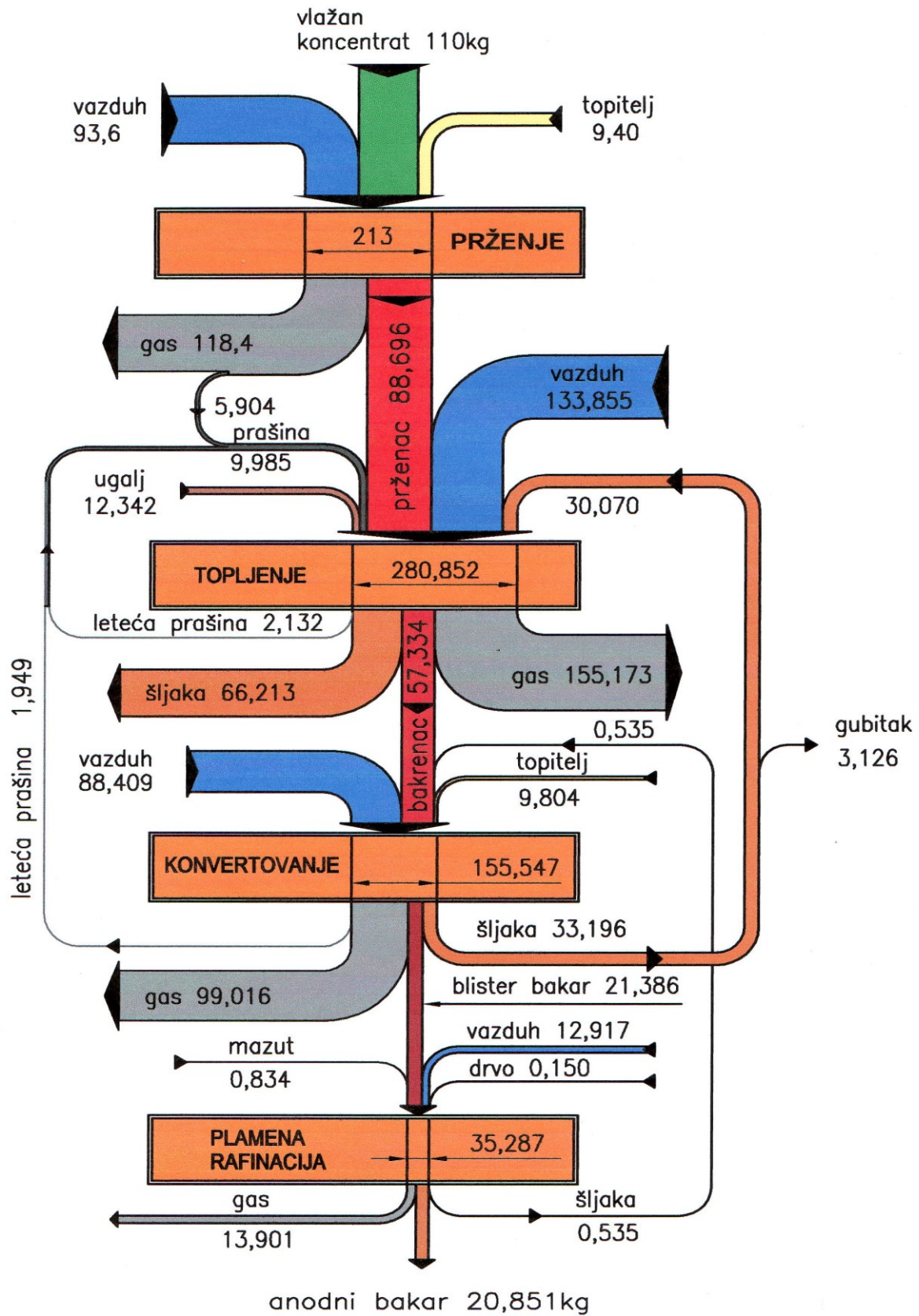
Termoenergetska analiza procesa proizvodnje anodnog bakra biće izvršena za kontrolnu površinu koja je postavljena uz konture (termoizolacije) peći obuhvatajući i priključke peći za odvod i dovod materijalnih tokova, a kontrolna površina topionice obuhvata skladište šarže i izlaz anodnog bakra iz topionice, ulaz vazduha, goriva i procesnih materijala, izlaz gasovitih produkata iz peći pre hlađenja i otprašivanja, osim kod plamenih peći gde je uključen deo toplote gasovitih produkata kojim se predgreva vazduh koji služi za sagorevanje goriva. Neto količina toplotne energije pare, koja se isporučuje Termoelektrani (1.013,11 MJ/t suvog koncentrata), izlazi iz kontrolne površine topionice (to jest plamene peći), pa se uzima u obzir kod određivanja ukupnog stepena iskorišćenja toplote ( $\eta_i$ ), a ne i kod stepena iskorišćenja toplote u procesu ( $\eta_{ip}$ ). Toplota tehnološke pare je u okviru kontrolne površine, pa je uzeta u obzir sa entalpijom vazduha, goriva ili kao tehnološka (procesna) para. U tabeli 38, osenčeni elementi presecaju kontrolnu površinu peći, ali ne i kontrolnu površinu topionice, pa se uzimaju u obzir samo kod toplotnog bilansa peći pojedinačno.

Na osnovu materijalnog i toplotnog bilansa procesa (*ili peći*) prikazaće se kvantitativna ocena procesa. Mineraloški sastav aktuelnog suvog koncentrata bakra je: 30,70% FeS<sub>2</sub>, 8,80% CuS, 0,70% Cu<sub>2</sub>S, 42,30% CuFeS<sub>2</sub>, 8,70% SiO<sub>2</sub>, 0,40% CaO, 2,30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i 6,10% ostalo. Toplotni bilans i korisna energija u procesu proizvodnje anodnog bakra u Topionici u Boru prikazani su u tabeli 2, a materijalni bilans na sl. 2 i dijagram raspodele toplote na sl. 3. Investirana toplota po fazama tehnološkog procesa proizvodnje bakra, svedena na jedinicu mase suvog koncentrata, iznosi [33]: za prženje šarže 2.031,944 MJ/t<sub>s.k.</sub>, za topljenje prženca u plamenoj peći 5.057,637 MJ/t<sub>s.k.</sub>, za konvertovanje bakrenca 2.318,261 MJ/t<sub>s.k.</sub> i za plamenu rafinaciju bakra u obrtnoj anodnoj peći 483,854 MJ/t<sub>s.k.</sub>. Količina toplote koja se odaje okolini (za kapacitet reaktora 40 t<sub>s.k.</sub>/h), za sve peći u proizvodnji anodnog bakra u Boru, iznosi 542,424 MJ/t<sub>s.k.</sub>, a za finalne proizvode pojedinih faza (prženac, bakrenac, poletine, blister bakar i anodni bakar) iznosi 374,965 MJ/t<sub>s.k.</sub>. Struktura rashoda toplote može se predstaviti na sledeći način: toplota koja se troši na endotermnost procesa iznosi 7,33%, toplota koja odlazi sa gasovitim produktima 50,59% i toplota sadržana u šljakama 17,89%. Toplota sadržana u produktima je deo od ukupno investirane toplotne energije u proces, a ona iznosi 8.051,9049 MJ/t<sub>s.k.</sub>

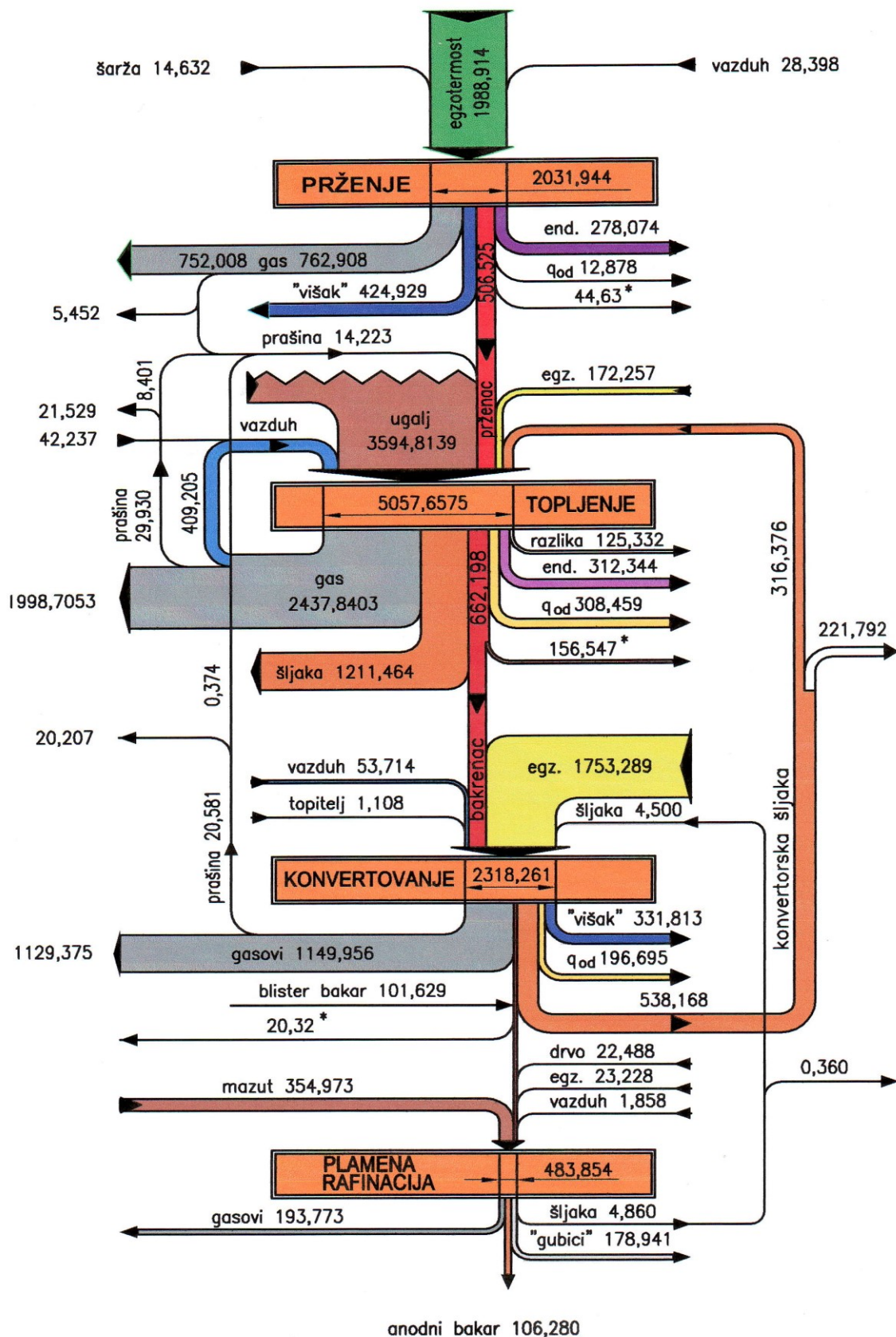


**Sl. 1. Tehnološka šema pirometalurškog postupka proizvodnje bakra u topionici u Boru do 2014. godina**

1-silos za šaržu, 2-fluosolid reaktor, 3,4-ciklon, 5-silos, 6-kula za hlađenje gasova, 7,12,17-elektrofilter, 8-preliv prženca (fluosil), 9-duvaljka za vazduh, 10-plamena peć, 11-utilizacioni parni kotao, 13-dimnjak, 14- PS konvertor, 15-dimohvatač, 16-komora za hlađenje, 18-dimnjak, 19-mešna kula, 20-anodna peć, 21-livna mašina



Sl. 2. Dijagram materijalnog bilansa u proizvodnji anodnog bakra u kg/100 kg suvog koncentrata



Sl. 3. Dijagram raspodele toplote u proizvodnji anodnog bakra u MJ/t suvog koncentrata

\*- dopuna do 100% (nesračunata toplota),  
 end – toplota utrošena na endotermnost procesa,  
 egz.- toplota oslobođena iz egzotermnosti procesa,  
 q<sub>od</sub>- toplota koja se odaje okruženju.

PROCES	ELEMENT	SPECIFIČNA MASA,		
		t/t <sub>s.k.</sub> <sup>1</sup>	MJ/t <sub>s.k.</sub>	%
<b>ULAZ:</b>				
1. Prženje	1. Vlažan koncentrat	1,1000	13,2145	0,16
	2. Topitelj	0,0940	1,4175	0,02
	3. Vazduh	0,9360	28,3980	0,35
	4. Egzotermnost	-	1.988,9140	24,70
2. Topljenje	1. Gorivo	0,1234	3.594,8139	44,65
	2. Vazduh	1,3386	42,2370	0,52
	3. Egzotermnost	-	172,2520	2,14
	<b>4* Prženac<sup>2</sup></b>	<b>1,06299</b>	<b>508,5250</b>	-
	<b>5* Povratna prašina</b>	<b>0,09985</b>	<b>14,2230</b>	-
	<b>6* Šljaka konvertora</b>	<b>0,33196</b>	<b>316,3760</b>	-
3. Konvertovanje	1. Topitelj	0,0980	1,1080	0,01
	2. Vazduh	0,8841	53,7140	0,67
	3. Egzotermnost	-	1.753,2890	21,78
	<b>4* Bakrenac</b>	<b>0,57334</b>	<b>505,6510</b>	-
	<b>5* Šljaka rafinacije</b>	<b>0,00535</b>	<b>4,5000</b>	-
4. Plamena rafinacija	1. Mazut	0,00830	354,9730	4,41
	2. Drvo za polovanje	0,00150	22,4880	0,28
	3. Vazduh	0,12920	1,8580	0,02
	4. Egzotermnost	-	23,2280	0,29
	<b>5* Blister bakar</b>	<b>0,21386</b>	<b>81,3090</b>	-
<b>UKUPNO:</b>		<b>4,7131</b>	<b>8.051,9049</b>	<b>100,00</b>
<b>KORISNA ENERGIJA:</b>				
1. Prženje	1. Endotermnost	-	278,0740	25,83
	<b>2* Prženac</b>	<b>1,06296</b>	<b>508,5250</b>	
	<b>3* Povratna prašina</b>	<b>0,09985</b>	<b>14,2230</b>	
2. Topljenje	1. Endotermnost	-	312,3440	29,01
	2* Bakrenac	0,57334	505,6510	
	<b>3* Gasovi<sup>3</sup></b>	<b>1,55173</b>	<b>409,2050</b>	
3. Konvertovanje	<b>1* Blister bakar</b>	<b>0,21386</b>	<b>81,3090</b>	
	2. "Višak" toplote	-	331,8130	30,82
	<b>3* Šljaka</b>	<b>0,33196</b>	<b>316,3760</b>	
4. Plamena rafinacija	<b>1* Šljaka</b>	<b>0,00535</b>	<b>4,5000</b>	
	2. Zagrevanje		154,4530	14,34
<b>UKUPNO:</b>		<b>-</b>	<b>1.076,684</b>	<b>100,00</b>

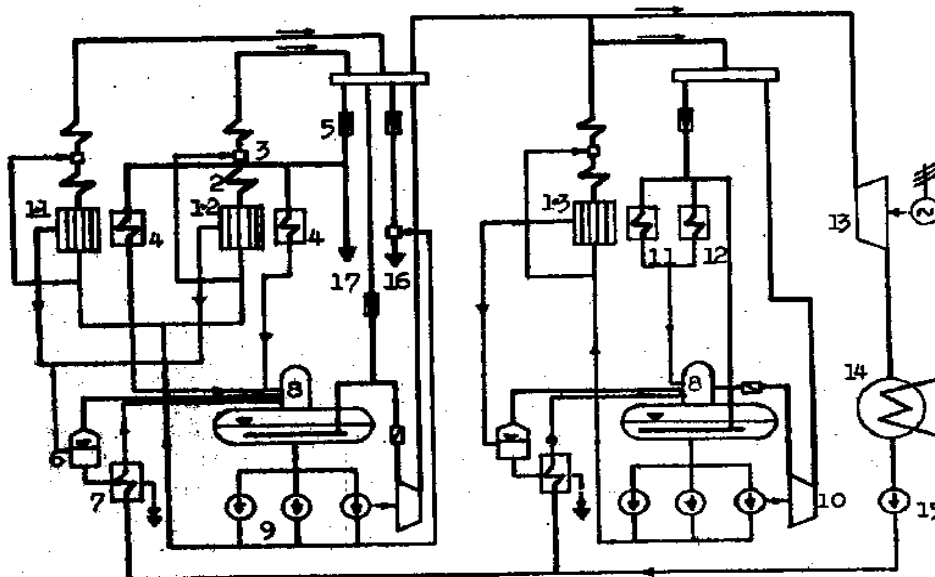
Korisna energija procesa obuhvata toplotnu energiju materijalnih tokova na ulazu odgovarajuće peći, jer od predhodne tehnološke operacije do naredne izvesna količina toplote proizvoda se odaje okolini. Deo toplotne energije gasovitih produkata plamene peći (409,205 MJ/t suvog koncentrata) koristi se za predgrevanje vazduha. "Višak" toplote u procesnom prostoru

<sup>1</sup> Indeks s.k. označava da je reč o masi suvog koncentrata

<sup>2</sup> Istaknuti elementi ( \* ) učestvuju u bilansu procesa, a u bilansu Topionice ne učestvuju, jer njihova promena ne izlazi iz okvira kontrolne površine

<sup>3</sup> Deo toplote gasova služi za predgrevanje vazduha

konvertora koristi se za pretapanje povratnih i drugih materijala radi regulisanja temperature u procesnom prostoru, pa je zbog toga uzeta kao korisna energija.



**Sl. 4. Toplotna šema topionice bakra u Boru**

1-1-utilizacioni parni kotao UK-4, 1-2- utilizacioni parni kotao UK-3, 1-3- utilizacioni parni kotao UK-1, 2- pregrejač pare, 3- hladnjak pare, 4- predgrejač vazduha za sagorevanje goriva, 5- umanjivač pritiska, 6- ekspanziona posuda odsoljavanja, 7- bridov zagrejač kondenzata, 8- spremnik napojne vode, 9- napojna pumpa, 10- parna turbina za napojnu vodu, 11- predgrejač sekundarnog vazduha, 12- zagrejač primarnog vazduha, 13- parna turbina u Termoelektrani, 14- kondenzator pare u Termoelektrani, 15- pumpa za kondenzat u Termoelektrani, 16- tehnološka para (200°C i 12 bar) i 17- tehnološka para (400°C i 12 bar)

Na osnovu toplotnog bilansa i tabele 2, stepen iskorišćenja toplote u procesu može se predstaviti kao odnos korisne i dovedene toplote, i on iznosi:

a) za proces prženja u fluosolid reaktoru

$$\eta_{ip} = (278,074 + 508,525) / (13,2145 + 1,4175 + 28,3980 + 1.988,9140) = 0,3871,$$

b) za proces topljenja prženca u plamenim pećima:

$$\eta_{ip} = (312,344 + 505,651 + 409,205) / (3.594,8139 + 42,2370 + 172,252 + 508,525 + 14,223 + 409,205 + 316,376) = 1.227,200 / 5.057,637 = 0,2426, \text{ za plamenu peć broj 1 i}$$

$$\eta_{ip} = (312,344 + 505,651 + 522,849) / (3.674,81 + 20,433 + 172,252 + 508,525 + 14,223 + 522,849 + 316,376) = 1.340,844 / 5.229,473 = 0,2564, \text{ za plamenu peć broj 2.}$$

c) za proces konvertovanja bakrenca

$$\eta_{ip} = (81,309 + 331,813 + 316,376) / (1,108 + 53,714 + 1.753,289 + 505,651 + 4,5) = 0,3147,$$

d) za proces plamene rafinacije blister bakra

$$\eta_{ip}=(4,5+154,453)/(354,937+22,488+1,858+23,228+81,309)= 0,3285.$$

Stepen iskorišćenja toplote za ceo pirometalurški proces proizvodnje anodnog bakra u topionici RTB-Bor iznosi

$$\eta_{ip}=1.076,684/8.051,9049= 0,1337 \quad \text{iz bakrenca plamene peći broj 1 i}$$

$$\eta_{ip}=1.076,684/8.110,097= 0,1328 \quad \text{iz bakrenca plamene peći broj 2.}$$

Deo sekundarne toplotne energije gasovitih produkata procesa topljenja u plamenim pećima koristi se za proizvodnju pare, uzimajući u obzir da se ta količina toplotne energije sadrži u isporučenoj pari za Termoelektranu ( 0,353 t pare za 1t suvog koncentrata,  $\Delta i_1=2.870$  MJ/t pare), prema dijagramu ona se nalazi izvan kontrolne površine. U tom slučaju, ukupni stepen iskorišćenja toplote za plamene peći je:

$$\eta_i= (1.227,200+0,353 \cdot 2.870)/5.057,637= 0,4430 \quad \text{za plamenu peć broj1 i}$$

$$\eta_i= (1.340,844+0,353 \cdot 2.870)/5.229,473=0,4501 \quad \text{za plamenu peć broj 2,}$$

a za ceo proces proizvodnje anodnog bakra u topionici, iz bakrenca plamene peći:

$$\eta_i=(1.076,684+0,353 \cdot 2.870)/8.051,9049= 0,2596 \text{ za plamenu peć broj 1,}$$

$$\eta_i=(1.076,684+0,353 \cdot 2.870)/8110,097=0,2577 \text{ za plamenu peć broj 2.}$$

Iskorišćenjem sekundarne energije za proizvodnju pare, koja se isporučuje Termoelektrani, stepen iskorišćenja toplote procesa topljenja prženca u plamenoj peći broj 1 beleži porast sa  $\eta_{ip}=0,2426$  na  $\eta_i= 0,4430$ , a u plamenoj peći broj 2 sa  $\eta_{ip}= 0,2564$  na  $\eta_i= 0,4501$ .

Energetski ( $\eta$ ) i eksergetski ( $v$ ) stepen iskorišćenja procesa proizvodnje anodnog bakra u Topionici bakra u Bor iznose:

a) ukupni energetski i eksergetski stepen iskorišćenja

$$\eta= 2.354,008/13.520,913= 0,1741,$$

$$v= 1.492,280/11.793,994= 0,1265,$$

b) energetski i eksergetski stepen iskorišćenja energije u procesu (*uzima se bez energije i eksergije isporučene pare Termoelektrani*)

$$\eta_p= (590,418+750,480)/13.520,913= 0,0992,$$

$$v_p= (487,949+586,644)/11.793,994= 0,0911.$$

Velika neracionalnost u korišćenju energije proizvedene pare sadržana je u činjenici da se para za tehnološke potrebe u Topionici hladi mešanjem, a pritisak snižava prigušivanjem. Isporučena para Termoelektrani prigušuje se do pritiska od 19 bara, a zatim se koristi za proizvodnju električne ili toplotne energije za potrebe toplifikacije ili pripreme sanitarne vode. Na ovaj način se snižava raspoloživi toplotni pad pare, a povećava njena entropija, što uzrokuje postizanje nižeg stepena iskorišćenja toplotnog ciklusa (*oko 0,1600 umesto mogućeg 0,2967 [8]*). Imajući u vidu da se radi na uvođenju nove tehnologije topljenja u topionici, potrebno je da se razmotre mogućnosti zaokruživanja ciklusa iskorišćenja pare u metalurškom kompleksu, a da Termoelektrana preraste u toplanu. Za ovu svrhu u opciji su dva rešenja: primena protivpritisne parne turbine sa oduzimanjem pare i kondenzaciona parna turbina sa oduzimanjem pare. Na taj način se otvaraju mogućnosti za proizvodnju električne energije i toplote, električne energije i tehnološke pare, ili električne energije, toplote i tehnološke pare. Sa energetskog aspekta postoji opravdanje i za korišćenje sekundarne energije procesa prženja i konvertovanja, pre svega fizičke



toplote gasovitih produkata. Korišćenjem sekundarne energije gasovitih produkata procesa prženja šarže i konvertovanja bakrenca, za proizvodnju pare u utilizacionim parnim kotlovima, ukupni stepeni korisnosti se uvećavaju, i to: energetski  $\eta = 0,2802$ , a eksergetski  $\nu = 0,1767$ . U tom slučaju, energetski ( $\eta_p$ ) i eksergetski ( $\nu_p$ ) u procesu ostaju nepromenjeni, naravno pod navedenim uslovima.

**Energetski i eksergetski bilans u proizvodnji anodnog bakra u Topioniciu Boru<sup>4</sup> TABELA 3.**

ELEMENT	KOLIČINA t/t <sub>s,k</sub>	ENERGIJA			EKSERGIJA		
		HEMIJSKA MJ/t <sub>s,k</sub>	FIZIČKA MJ/t <sub>s,k</sub>	UKUPNO MJ/t <sub>s,k</sub>	HEMIJSKA MJ/t <sub>s,k</sub>	FIZIČKA MJ/t <sub>s,k</sub>	UKUPNO MJ/t <sub>s,k</sub>
<b>ULAZ:</b>							
1. Suvi koncentrat	1,0000	8.907,674	-	8.907,674	7.090,142	-	7.090,142
2. Kvarc	0,0540	-	-	-	-	-	-
3. Krečnjak	0,0400	15,984	-	15,984	25,533	-	25,533
4. Kvarc u konvertoru	0,0980	-	-	-	-	-	-
5. Ugalj	0,1236	3.589,468	-	3.589,468	3.667,212	-	3.667,212
7. Mazut u anodnoj peći	0,0083	332,000	-	332,000	335,320	-	335,320
8. Drvo za polovanje	0,0015	22,488	-	22,488	22,488	-	22,488
9. Električna energija <sup>5</sup>	181,4720	-	653,299	653,299	-	653,299	653,299
UKUPNO		12.867,614	653,299	13.520,913	11.140,695	653,299	11.793,994
<b>KORISNA ENERGIJA I EKSERGIJA:</b>							
1. Endotermnost	-	590,418	-	590,418	-	-	487,949
2. Anodni bakar	0,212	750,480	-	750,480	487,949	-	586,644
3. Para isporučena TE	0,353	-	1.013,110	1.013,110	586,644	417,687	417,687
UKUPNO		1.340,898	1.013,110	2.354,008	1.074,593	417,687	1.492,280
Gubici energije i eksergije				11.166,905			10.301,714

Energije i eksergije su određene za temperaturu okoline  $T_o = 293$  K,

S obzirom da je hemijska eksergija u [25] data za  $T_o = 298,15$  K, izvršena je korekcija na  $T_o = 293,15$  K,

Eksergija goriva je određena na osnovu istraživanja N. D. Zaharova [25].

U tehničkim i finansijskim izveštajima i dokumentima uobičajeno je u Boru da se toplotna energija uslovno iskazuje u toni pare pritiska 1,6 MPa i temperature 320°C (to jest  $1\text{MW}_{th} = 1,36$  tona pare). na ovaj način se izražava uglavnom potrošnja toplotne energije za tehnološke potrebe, toplifikacije i priprema tople sanitarne vode. U ovim podacima ima dosta nepreciznosti, u pogledu tačnog merenja, ali za gruba sagledavanja o potrošnji toplotne energije mogu da daju, na neki način, prilično realnu sliku. U tabeli 4 je prikazana proizvodnja i potrošnja pare u Boru u periodu 1993. do 1998. godine.

Godišnja isporuka pare iz utilizacionih parnih kotlova topionice bakra, za period 1993.-1997. godine, u masi čini 21,40-39,98% (u proseku 30,09%). U periodu kada radi toplifikacioni sistem, period oktobar-april, "topionička" para učestvuje sa 21,24%, a u periodu kada toplifikacioni sistem ne radi, period april-oktobar, "topionička" para pokriva skoro 100% sve potrebe za toplotom u Boru (tehnološke potrebe i priprema tople sanitarne vode).

**Potrošnja toplotne energije (vodene pare) u Boru**

**TABELA 4.**

KOLIČINA PARE, t	GODINA					
	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.
<b>1. Proizvodnja pare</b>	453.808	414.443	436.987	465.378	444.460	416.363

<sup>4</sup> Vrednosti za hemijsku energiju i eksergiju su uzete iz [25]

<sup>5</sup> U kWh/t suvog koncentrata, a obuhvata i potrošnju energije u Fabrici kiseonika

• nova toplana		154.909	159.716	174.398	145.835	131.978
• stara toplana		121.416	166.152	123.954	120.928	106.562
• iz topionice	97.121	113.606	111.119	167.026	177.697	177.823
<b>2. Potrošnja pare</b>						
• za grejanje	451.347	398.786	425.045	412.533	414.703	368.643
• za proizv. el. energiju	2.461	15.657	11.942	52.845	29.757	47.720
• RBN	25.408	25.416	30.393	25.504	27.286	24.267
• TIR	102.795	111.430	120.082	171.171	153.645	158.658
• FOD	15.541	14.664	19.038	16.613	17.446	15.467
• Ind. zona VII km	10.702	7.329	9.699	11.192	12.587	10.039
• Laboratorija	1.874	1.432	2.097	1.631	1.880	1.678
• Grejanje grada	285.904	250.076	253.127	234.460	224.512	200.750
• SPC bazeni	6.007	325	-	500	720	240
• Topla voda u NGC	3.116	4.064	2.551	4.307	6.384	5.264
<b>3. Tehnološka para<sup>6</sup></b>						
• Elektroliza	47.980	47.090	63.177	79.644	83.244	69.430
• Topionica	18.767	24.513	26.132	47.322	51.138	62.033
<b>4. Potrošnja uglja u TE, t</b>	97.504	73.531	77.505	79.253	63.384	55.344
• Hd, kJ/kg		12.101	13.000	13.049	15.435	16.069

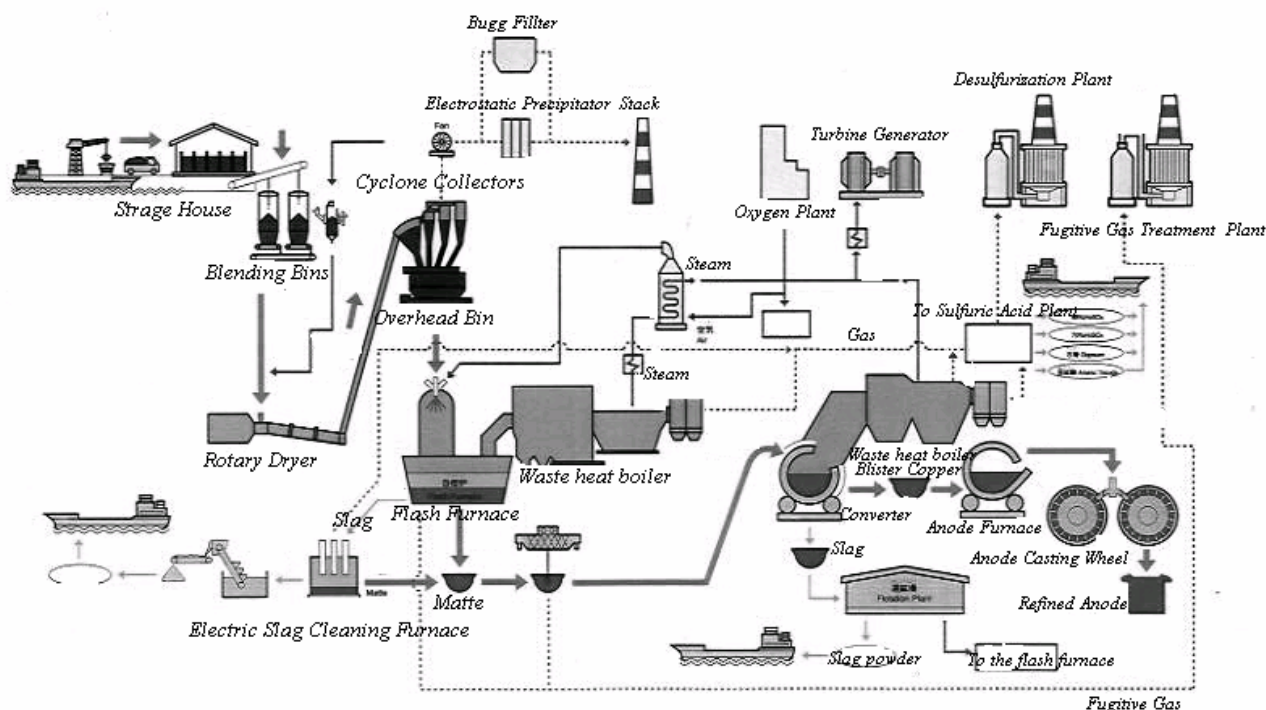
<sup>6</sup> Potrošnja tehnološke pare u topionici nije uzeta u gornjem delu tabele (u potrošnji TIR-a), jer je to sopstvena para, a para utrošena u elektrolizi je uzeta u potrošnji TIR-a.

### 3.0. UVOĐENJE OUTOKUMPU FLASH SMELTING PROCES U BORU

Proces topljenja bakarnih koncentrata u lebdećem stanju - *Outokumpu Flash Smelting Proces*, primenjen je u industriji od 1949. godine, u topionici Harjavalta u Finskoj. U poslednjih pedeset godina Outokumpu proces imao je vrlo uspešan razvitak, a danas je najrasprostranjeniji proces u metalurgiji bakra u svetu, tehnički i aparativno najusavršeniji autogeni proces topljenja sulfidnih bakarnih koncentrata.

Početak topljenja bakarnih koncentrata po Outokumpu postupku označio je početak nove ere u metalurgiji bakra. Ova tehnologija je usavršavana sa potrebama vremena, razrađena su i primenjena nova rešenja u pogledu razvitka procesa, energije, tehnike, ekologije, ekonomije itd. Zahvaljujući tome, proces Outokumpu je ispoljio fleksibilnost, kako u pogledu topljenja koncentrata različitog sastava tako i u pogledu kapacitivnih potreba prerade koncentrata od 400-3000 t/dan.

Sve navedene okolnosti omogućile su da trenutno u svetu egzistira više od četrdeset ovih peći, od kojih 34 u metalurgiji bakra što je čini najzastupljenijom tehnologijom. Ovom tehnologijom proizvodi se više od jedne trećine bakra u svetu .



Sl. 5. Šema (Flow Sheet) topionice Toyo<sup>7</sup> u SUMITOMO METAL MINING CO. LTD, Japan, godišnjeg kapaciteta 450.000 tona katodnog bakra<sup>8</sup>

Outokumpu Flash Smelting Proces je u svom dugogodišnjem razvoju pretrpeo niz tehnoloških unapređenja, počevši od primene predgrejanog vazduha (400-1050°C), a zatim i do

<sup>7</sup> AKADA AKIHIKO, EFFECTIVE ENERGY UTILIZAYION ON JAPANESE COPPER SMELTERS

<sup>8</sup> Ostvarena prosečna dnevna proizvodnja marta meseca 1997. godine -Flash peć: suvi koncentrat 2001 t/d, bakrenac (62,9%Cu) 1159 t/d, šljaka 1018 t/d, vazduh 31800 m<sup>3</sup>/h, obogaćenje kiseonikom na 44,7%, poletina 3,5%; -konvertori: blister baker 943 t/d, šljaka 373 t/d, vazduh (sa 22%O<sub>2</sub>) 41500 m<sup>3</sup>/h; -anodne peći: anodni bakar 901 t/d, livenje 55 t/h; -flotacija: konvertorska šljaka 450 t/d, koncentrat šljake 113 t/d, talog 337 t/d; -fabrika sumporne kiseline: količina gasa 160500 m<sup>3</sup>/h sa 10,5%SO<sub>2</sub>, proizvodnja sumporne kiseline 1833 t/d, konverzija 99,5%; -para i parna turbina: proizvodnja pare u kotlu Flash peći 36,0 t/h, u kotlu konvrtora 14,6 t/h i angažovana snaga parne turbine 7232 kW (izvor: Kozo Baba, The Toyo Copper Smelter of Sumitomo Metal Mining, JOM page 41, 1997 October)

primene vazduha obogaćenog kiseonikom (30-90%O<sub>2</sub>), a u Japanu (*topionica bakra Tamano*) je urađena modifikacija fleš peći ugradnjom elektroda u horizontalnom delu (*Flash Smelting Furnace with Electrodes, FSFE*).

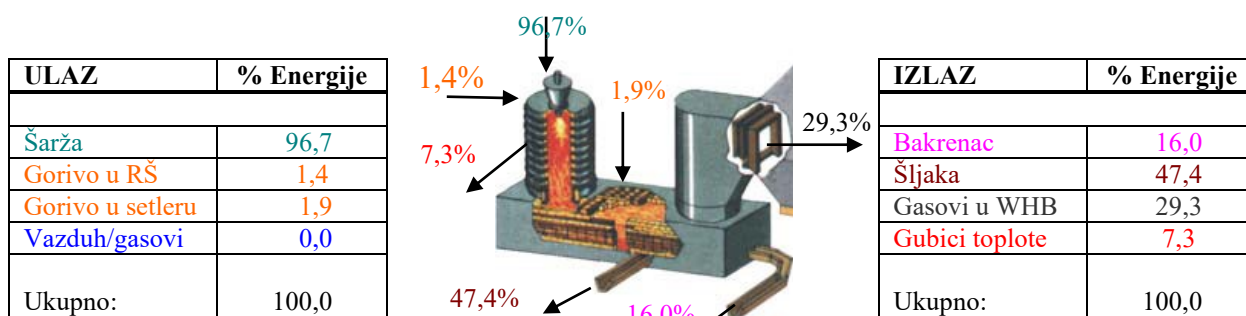
Stepen obogaćenja vazduha kiseonikom i povećanje sadržaja bakra u bakrencu, predstavljaju najvažnija procesna unapređenja. Ova tehnološka poboljšanja imaju direktan uticaj na smanjenje troškova kompletnog procesa topljenja, konvertovanja, gasnog trakta i proizvodnje sumporne kiseline. Obogaćivanje vazduha kiseonikom i sadržaj bakra u bakrencu imaju isti cilj, a to je smanjenje ukupne potrošnje energije<sup>9</sup>.

Poboljšanje tehnoloških parametara rada celokupne tehnološke linije rezultiralo je i povećanom utilizacijom sumpora iz gasovitih produkata, a nivo ukupne utilizacije sumpora iz šarže iznosi 95-99%.

### 3.1. SEKUNDARNA ENERGIJA PROCESA TOPLJENJA

Topljenje koncentrata bakra u Flash Smelting Furnace<sup>10</sup> je visoko autogeni proces u kojem se postiže potrošnja energije od 22,99 GJ/t bakra (ekvivalent energije 19,36 GJ/t) i to: priprema šarže 0,60 GJ/t, sušenje šarže 1,30 GJ/t, topljenje 0,84 GJ/t (energija proizvedene pare je -2,67 GJ/t), konvertovanje 0,67 GJ/t (otpadna toplota -0,96 GJ/t), flotiranje šljake 1,58 GJ/t, otprašivanje gasova 0,66 GJ/t, otprašivanje flegmatičnih gasova 3,77 GJ/t, proizvodnja sumporne kiseline 4,08 GJ/t, rashladna voda 0,10 GJ/t, plamena i elektrolitička rafinacija bakra 6,14 GJ/t i materijali (održavanje opreme, kiseonik, topitelji) 3,25 GJ/t katodnog bakra.

U tab. 6. je prikazan ostvareni toplotni bilans Sumitomo Toyo Copper Smelting u 1985. i 2003. godini i plan za 2007. godinu, a na sl. 6 je prikazan toplotni bilans po materijalnim "strujama" jedne Flash peć.



Sl. 6. Toplotni bilans Flash Smelting Proces<sup>11</sup>.

<sup>9</sup> U topionici Tamano u Japanu, kapaciteta 598.000 t/a suvog koncentrata (*hemijskog sastava: 32,70 %S, 22,50 %Cu, 29,10 %Fe, 8,10 % SiO<sub>2</sub>*), 228.000 t/a bakrenca (*sa 60%Cu*), 213.000 t/a blister bakra, 200.000 t/a anodnog bakra i više od 160.000 m<sup>3</sup>/h proizvodnje sumporne kiseline (*gasovi sadrže 14 %SO<sub>2</sub>*), to jest 2.300 t/dan 100% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Godišnje se dobija 400.000 t šljake iz Flash peći (Flash Smelting Furnace with Electrodes FSFE) sa sadržajem 0,7 %Cu. Potrošnja kiseonika je 15.000 m<sup>3</sup>/h za potrebe Flash peći i maksimum 2.200 m<sup>3</sup>/h za potrebe konvertora. U 1996. godini ostvarena je mesečna potrošnja: kiseonika 9.626 km<sup>3</sup>, tečnog goriva 1.193 m<sup>3</sup>, koksa 1.572 t, vode 47.232 m<sup>3</sup> i električne energije 11.398 MWh (*uključujući i potrošnju u postrojenju za razdvajanje vazduha*). U isto vreme mesečna proizvodnja iznosi: 23.678 t anodnog bakra, 50.091 t sumporne kiseline, 29.327 t bakrenca (*sa 61,5 %Cu*), 23.076 t šljake iz Flash peći (*sa 0,78 %Cu*) i 8.790 t šljaka iz konvertora. Topionica zapošljava 105 operatora i 9 radnika u stručnim službama [16].

<sup>10</sup> Charles H. Pitt and Milton E. Wadsworth, An Assessment of Energy Requirements in Proven and New Copper Processes report for the US Department of Energy, contract EM-78-S-07-1743.  
Andrzej Warczok and Gabriel Riveros, Energy in batch, continuous and one-step copper Pyrometallurgical processes, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas

<sup>11</sup> Ilkka V. Kojo, Hannes Storch, COPPER PRODUCTION WITH OUTOKUMPU FLASH SMELTING: AN UPDATE, Sohn International Symposium ADVANCED PROCESSING OF METALS AND MATERIALS, VOLUME 8 - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SULFIDE SMELTING 2006, Edited by F. Kongoli and R.G. Reddy TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006

***Toplotni bilans Topionice Sumitomo Toyo Smelter u Japanu<sup>12</sup> TABELA 6.***

	Year 1985	2003	2007(plan)			
<b>OPERATING CONDITION</b>						
concentrate charge (ton/hour)	44.5	90	164.6			
dust generation ratio(%)	11.8	5.1	4.0			
O <sub>2</sub> enrichment in Reaction Air	32.1	49.5	72.1			
matte grade	56.0	63.5	65.0			
<b>HEAT INPUT and PRODUCTION (GJ/hour) (GJ/hour) (%)</b>						
heat of matte and SO <sub>2</sub> production	80.0	51	172.9	84	382.5	99
heat for decomposition of dust	-24.1	-15	-22.0	-11	-32.8	-9
sensible heat of ore	2.5	2	5.1	2	10.1	3
sensible heat of reaction air	17.1	11	15.0	7	8.7	2
oil and pulverized coal	81.1	52	35.3	17	17.1	4
heat input total	156.7	100	206.4	100	385.5	100
<b>HEAT OUTPUT(GJ/hour)</b>						
sensible heat of matte and slag	45.9	29	103.2	50	209.5	54
sensible heat of gas	73.1	47	65.4	32	117.4	30
sensible heat of dust	7.5	5	7.4	4	15.9	4
heat losses	24.7	16	25.0	12	33.1	9
others	5.5	3	5.3	3	9.7	3
heat output total	156.7	100	206.4	100	385.6	100

Na osnovu [1, 15], za prikazani parametri rada Flash Smelting Furnace, postavlja se pitanje najracionalnije iskorišćenje sekundarne (otpadne) toplote iz procesa topljenja i proizvodnje sumporne kiseline, koji, ne znam iz kojih razloga, nije predmet Ugovora između RTB-Bor i SNC LAVALIN iz Kanade.

Količina toplotne energije sa gasovitim produktima procesa topljenja koncentrata bakra (51,6 t<sub>sk</sub>/h) u Flash Smelting Furnace u Boru, nakon modernizacije topionice bakra u Boru, sastoji se od toplotne energije gasova i poletine. Ona je određena za temperature 1270°C i 350°C i količinu gasovitih produkata  $V_{Gw}=38.810 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $v_{Gw}=10,781 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i prikazana je u tabeli 7.

***Količina toplotne energije gasovitih produkata procesa topljenja koncentrata bakra TABELA 7***

KOMPONENT GASOVA	SADRŽAJ KOMPONENTATA GASOVA, 100 r <sub>i</sub> , vol. %	ENTALPIJA NA 350°C, $i_{Gw}^{350^\circ}$ , kJ/m <sup>3</sup>	ENTALPIJA NA 1270°C, $i_{Gw}^{1270^\circ}$ , kJ/m <sup>3</sup>	$\Delta i_{Gw} = i_{Gw}^{1270^\circ} - i_{Gw}^{350^\circ}$ , kJ/m <sup>3</sup>	$\Delta Q_{Gw} = r_i \cdot \Delta i_{Gw} \cdot V_{Gw}$ , kW <sub>t</sub>
SO <sub>2</sub>	25,80	696,26	2.893,06	2.196,80	6.110,14
SO <sub>3</sub>	0,53	≈696,26	2.893,06	2.196,80	125,51
H <sub>2</sub> O	1,80	543,87	2.279,69	1.735,82	336,82
CO <sub>2</sub>	0,64	663,61	2.898,14	2.234,53	154,16
N <sub>2</sub>	68,01	460,55	1.805,85	1.345,30	9.863,04
O <sub>2</sub>	3,50	478,55	1.914,61	1.436,06	541,82
SVEGA:	100,00	$\sum i_{Gwi} \cdot r_i = 527,33$	2.116,49	1.589,16	17.131,49
Poletina <sup>13</sup>	69,00	19,20	69,67	50,47	544,09
Hemijske reakcije[2]					2.266,67
Gubici toplote [1]					-830,00
UKUPNO:					19.112,25

<sup>12</sup> AKADA AKIHIKO, EFFECTIVE ENERGY UTILIZAYION ON JAPANESE COPPER SMELTERS

<sup>13</sup> Sadržaj poletine uzet je  $69 \text{ g/m}^3$  [1] i specifična toplota poletine  $c_{pm}=0,795 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

Na osnovu tabele 7, specifična toplota i entalpija gasovitih produkata iznosi:

$$\begin{array}{lll} \text{na } 350^{\circ}\text{C} & c_{pm} = 1,708 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) & i_{Gw}^{350^{\circ}} = 527,33 \text{ kJ}/\text{m}^3 \\ \text{na } 1270^{\circ}\text{C} & c_{pm} = 1,7 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) & i_{Gw}^{1270^{\circ}} = 2.116,16 \text{ kJ}/\text{m}^3. \end{array}$$

Gustoća gasovitih produkata procesa topljenja koncentrata bakra, zapreminskog sastava prema tabeli 1 pri normalnim uslovima ( $0^{\circ}\text{C}$  i  $1,01325 \text{ bar}$ ), ima vrednost:

$$\rho_{Gw} = \sum r_i \cdot \rho_i = r_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + r_{SO_3} \cdot \rho_{SO_3} + r_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + r_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + r_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + r_{O_2} \cdot \rho_{O_2} = 0,258 \cdot 2,9263 + 0,0053 \cdot 3,571 + 0,018 \cdot 0,804 + 0,0064 \cdot 1,977 + 0,6801 \cdot 1,25046 + 0,035 \cdot 1,42895 = 1,7015 \text{ kg}/\text{m}^3.$$

U ponudi Foster Wheeler Energia OY iz Finske [2] prikazan je toplotni bilans i proizvodnja pare u utilizacionom parnom kotlu, za hlađenje gasovitih produkata Flash peći za topljenje koncentrata bakra, za srednju količinu gasovitih produkata  $38.810 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Toplotni bilans utilizacionog parnog kotla Flash peći i proizvodnja pare** **TABELA 8.**

PARAMETAR	MERA	SREDNJA VREDNOST PROTOKA GASOVA $38.810 \text{ m}^3/\text{h}$
Temperatura gasova na ulazu u parni kotao	$^{\circ}\text{C}$	1270
Temperatura gasova iza radijacionog dela	$^{\circ}\text{C}$	600
Temperatura gasova na izlazu iz parnog kotla	$^{\circ}\text{C}$	350
Količina poletine	kg/h	2.677,89
Toplota od hlađenja gasova	$\text{MW}_t$	17,13
Toplota iz hemijskih reakcija	$\text{MW}_t$	2,27
Toplota iz hlađenja poletine	$\text{MW}_t$	0,54
Toplota od zračenja gasova, rastopa i površine peći <sup>14</sup>	$\text{MW}_t$	1,97
Ukupna toplota u parnom kotlu $\Delta Q_{Gw}$	$\text{MW}_t$	21,91
Gubici toplote radijaciom <sup>15</sup>	$\text{MW}_t$	0,46
Gubici toplote podsisavanjem vazduha <sup>16</sup>	$\text{MW}_t$	0,47
Toplotna energija pare	$\text{MW}_t$	20,98
Produkcija zasićene pare pritiska $60 \text{ bar}(n)$ <sup>17</sup>	t/h	34,459

### 3.2. PROIZVODNJA PARE U UTILIZACIONOM PARNOM KOTLU U BORU

S obzirom da u skoro svim topionicama bakra, gde je primenjen autogeni tehnološki proces za hlađenje gasovitih produkata uglavnom se koriste utilizacioni parni kotlovi koji proizvode zasićenu vodenu paru, i za hlađenje gasova iz buduće peći u topionici u Boru predviđa se

<sup>14</sup> Mitovski, M., Energetska efikasnost utilizacionog parnog kotla plamene peći u proizvodnji bakra, Mašinstvo 40 (1991) 3-4, str. 208-213,

<sup>15</sup> Gubici u radijacionom delu kotla računati su kao 2% ukupne toplote u parnom kotlu

<sup>16</sup> Gubici od podsisavanja računati su kao 2% toplote pare

<sup>17</sup> Temperatura napojne vode je  $140^{\circ}\text{C}$

utilizacioni parni kotao bez pregrevanja proizvedene pare. Pritisak zasićene pare se predviđa 6,0 MPa(a) temperatura napojne vode (na ulazu u doboš kotla) 140°C.

**Parametri zasićene vodene pare za pritisak 6,0 MPa(a)**

**TABELA 9.**

PARAMETAR ZASIĆENE PARE	MERA	Parametar
Temperatura zasićenja $t_s$	°C	275,586
Specifična zapremina na krivoj $x=0, v'$	m <sup>3</sup> /kg	0,00131927
Specifična zapremina na $x=1,0, v''$	m <sup>3</sup> /kg	0,0324487
Specifična entalpija na $x=0, i'$	kJ/kg	1213,73
Specifična entalpija na $x=1,0, i''$	kJ/kg	2784,56
Latentna toplota isparavanja $r=i''-i'$	kJ/kg	1570,83
Specifična entropija na $x=0, s'$	kJ/(kg·K)	3,0274
Specifična entropija na $x=1,0, s''$	kJ/(kg·K)	5,8901
Entalpija napojne vode na 140°C, $i_w$	kJ/kg	593,40
Toplota $\Delta i=i''-i_w$	kJ/kg	2.191,76
Temperatura napojne vode $t_w,$	°C	140

Produkcija pare utilizacionog parnog kotla može se odrediti jednačinom

$$D=\Delta Q/(i''-i_w), \text{ kg/s}, \quad (1)$$

gde su:

$\Delta Q, \text{ kW}_t$ - količina toplote: gasovitih produkata, poletine, od hemijskih reakcija i gubitaka toplote, koja je iskorišćena u utilizacionom parnom kotlu (tabela 8, kolona 6),

$\eta_{ki}$ - unutrašnji stepen iskorišćenja utilizacionog parnog kotla  $\eta_{ki}=0,9673$

$i''$ , kJ/kg- entalpija pare koja se proizvodi u utilizacionom parnom kotlu (na izlazu),

$i_w$ , kJ/kg- entalpija kotlovske (napojne) vode.

$$D=\frac{(21910-460-470)\text{kW}_t}{(2784,56-593,40)\text{kW}_t} = 9,572 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ ili } 34,459 \text{ t/h.}$$

Za rad Flash Smelting Furnace 330 dana godišnje i prerade 400.000 t suvog koncentrata (sk), godišnja produkcija pare iznosi  $D_a=34,459 \text{ t/h} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}=272.915,28 \text{ t}_{\text{pare/a}}$  ili  $0,658 \text{ t}_{\text{pare/t}_{\text{sk}}}$  ili  $0,888 \text{ kg pare/ m}_n^3$  gasovitih produkata<sup>18</sup>.

Produkcija suvozasićene pare u utilizacionom parnom kotlu<sup>19</sup>, na osnovu tab. 8 i 9 i jednačine 1, i unutrašnjeg (neto) stepena iskorišćenja utilizacionog parnog kotla<sup>20</sup>  $\eta_k=0,82$ , je prikazana u tabeli 10. Raspoloživa količina toplote ( $\Delta Q$ ) kod srednje količine gasova je 17.131,49 kW<sub>t</sub> (tab. 8), poletine  $Q_{pl}=544,09 \text{ kW}_t$ , od hemijskih reakcija  $Q_{hr}=2.266,67 \text{ kW}_t$  i gubici toplote 830,00 kW<sub>t</sub>.

<sup>18</sup> U KGHM, Poljska 1,153 kg<sub>pare</sub>/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova, Pirdop Bugarska 0,714 kg<sub>pare</sub>/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova 100 t/h pare, 140000 m<sub>n</sub><sup>3</sup> /h gasova), Toyo Japan 0,720 kg<sub>pare</sub>/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova, 0,478 t<sub>pare</sub>/t koncentrata, ponuda Foster Wheeler 1998. god 0,91 kg<sub>pare</sub>/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova, ponuda Alstrom (1991. god) 1,09 kg<sub>pare</sub>/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova, Mitsui/Furukawa 0,725 t<sub>pare</sub> (51 bar, x=1)/m<sub>n</sub><sup>3</sup> gasova (80000 m<sub>n</sub><sup>3</sup> /h, 1350-350°C) [17].

<sup>19</sup> Prema [1] utilizacioni parni kotao ima produkciju pare 27,5 t/h suvozasićene pare pritiska 6 MPa.

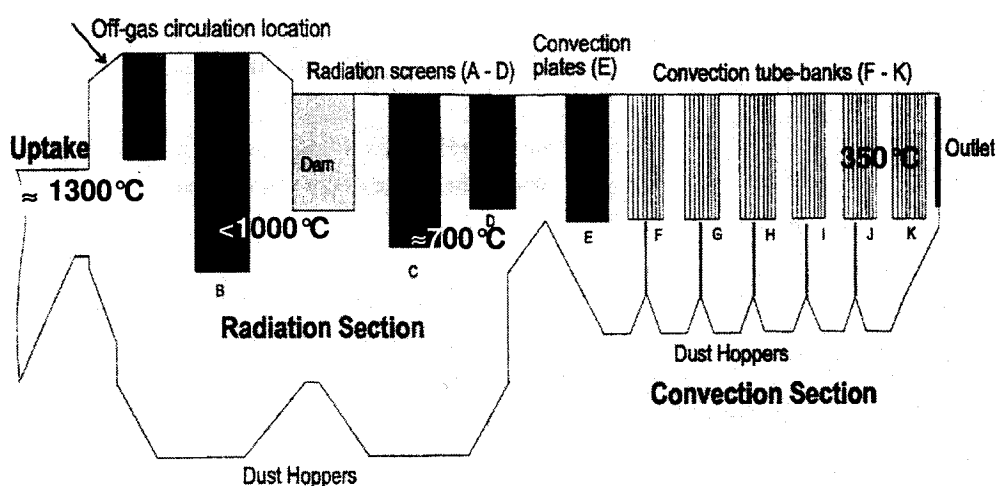
<sup>20</sup> Ukupni (bruto) stepen iskorišćenja utilizacionog parnog kotla, za  $V_{Gw}=38.810 \text{ m}_n^3 / \text{h}$ ,  $t_w=140^\circ\text{C}$ , zaprašnost gasova 0,069 kg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> i pritisak proizvedene pare  $p_{pp}=60 \text{ bar}$ , iznosi  $\eta_k = \frac{20,98 \text{ MW}_t}{(22,81+0,54+2,27) \text{ MW}_t} = 0,82$ .

Izbor temperature gasovitih produkata na izlazu iz ulaznog parnog kotla treba da se izvrši tako da tačka rose sumporne kiseline bude niža, kako bi se izbeglo niskotemperaturno koroziono oštećenje grejnih površina parnog kotla i površina gasovoda i ostalih uređaja. S tim u vezi izabrana je temperatura gasovitih produkata na izlazu iz ulaznog parnog kotla 350°C. S druge strane, temperatura kotlovske vode, na ulazu u doboš parnog kotla, treba da bude takva da se izbegne dostizanje tačke rose na bilo kom delu grejne površine parnog kotla. Preporučuje se da najniža temperatura metala grejne površine parnog kotla sa gasne strane bude za oko 50°C iznad tačke rose sumporne kiseline.

### 3.3. ISKORIŠĆENJE PROIZVEDENE SUVOZASIĆENE PARE U BORU

Kod izbora parametara pare u ulaznom parnom kotlu imalo se u vidu postojeće stanje TIR-a u smislu postojeće tehnološke i druge potrebe za parom, postojeći sistem termotehničkih agregata i uređaja i na kraju mogućnosti iskorišćenja pare u narednom periodu. Kod postavljanja dugoročnog programa razvoja energetike RTB-Bor, pre svega TIR-Bor, treba da se obuhvati i sva sekundarna energija bilo visokotemperaturne ili niskotemperaturne, kao što su procesi konvertovanje bakrenca, proizvodnje sumporne kiseline, povratna rashladna voda, otpadna toplota kondenzata i slično. S druge strane, kod izrade dugoročnog programa iskorišćenja raspoložive sekundarne i druge energije mora se voditi računa o parametrima energije koja se troši, o mogućnostima optimiziranja potrošnje i izbora parametara energije i dinamika potrošnje energija u toku zime, leta, danju, noći itd. Ovo pitanje zahteva kompatibilnost proizvodnje, potrošnje energije u Preduzeću i nabavke energije izvan kontrolne granice Preduzeća.

U dosadašnjoj višegodišnjoj praksi u većini topionica bakra, gde je uveden autogeni proces topljenja, uglavnom za hlađenje gasova peći koristi se ulazni parni kotao koji proizvodi zasićenu vodenu paru. Ovim se održavaju niže temperature grejnih površina pa se i smanjuje prljanje gasnog trakta parnog kotla. Tako, u topionici u Norilsku (Rusija) za hlađenje 151.000 m<sup>3</sup>/h gasova Flash peći za topljenje Cu/Ni koncentrata koriste se dva ulazna parna kotla kapaciteta po 49 kg/s zasićene pare pritiska 8,1 MPa. Parni kotlovi su isporučeni od strane firme Ahlstrom iz Finske (sada u sastavu Foster Wheeler SAD). Nasuprot tome, ulazni parni kotao za Flash peći sa najnižim pritiskom je ugrađen u topionici Boliden AB, Ronnskarsverken (Švedska). Proizvodnja pare je 4,44 kg/s zasićene pare pritiska 39 bar, a količina gasova, koji se hlade, iznosi 90.000 m<sup>3</sup>/h [6].



Sl. 7. Šematska ilustracija ulaznog parnog kotla ugrađen iza Flash Smelting Furnace<sup>21</sup>

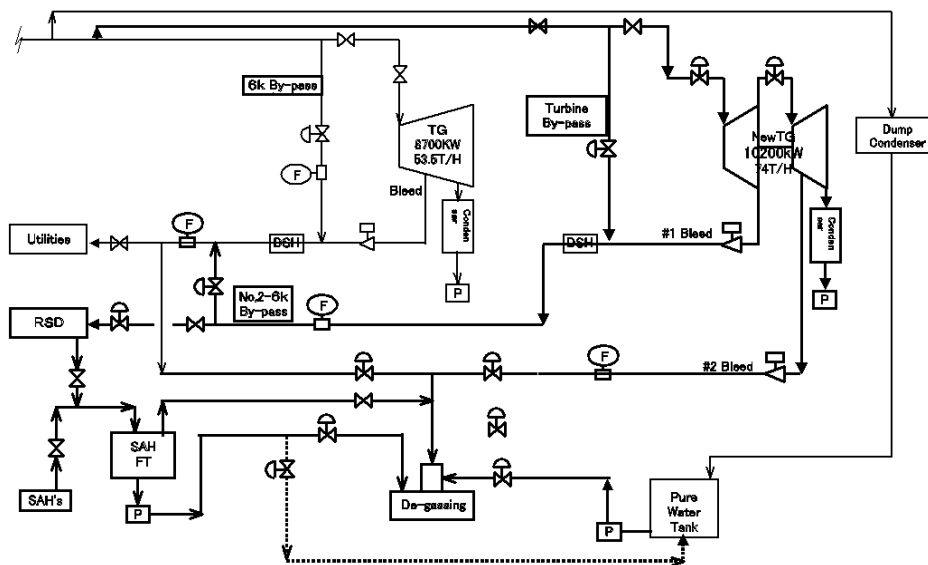
<sup>21</sup> Elli Miettinen, Thermal conductivity and characteristics of copper Flash Smelting flue dust accretions, doctorae theses Helsinki University of Technology, Helsinki 2008.



U utilizacionom parnom kotlu za hlađenje gasova Flash peći u topionici Outokumpu Oy<sup>22</sup>, Harjavalta (Finska) na početku rada ugrađen je pregrejač pare. Količina gasova je 25.000 m<sup>3</sup> /h, produkcija pare 2,2 kg/s pritiska 40 bar i temperatura 310°C. Kasnije pregrejač pare je izbačen iz pogona.

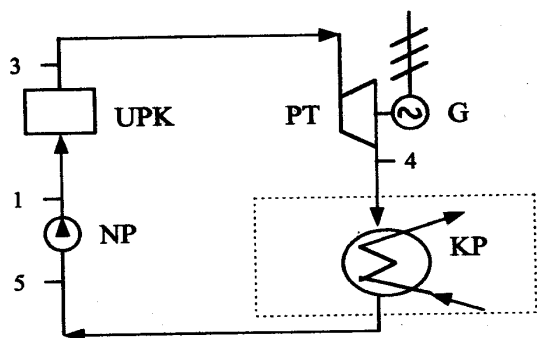
Za hlađenje 84.000 m<sup>3</sup> /h gasova Flash peći u topionici bakra Karadeniz Bakir, Isletmeri A.S., Sasun (Turska) ugrađen je utilizacioni parni kotao kapaciteta 14,9 kg/s pare pritiska 44 bar i temperature 350°C.

U topionici Mount Morgan, Queensland (Australija) za hlađenje gasova Flash peći, čija količina je 15.000 m<sup>3</sup> /h, ugrađen je utilizacioni parni kotao kapaciteta 2,08 kg/s pare pritiska 38 bar i temperature 500°C.

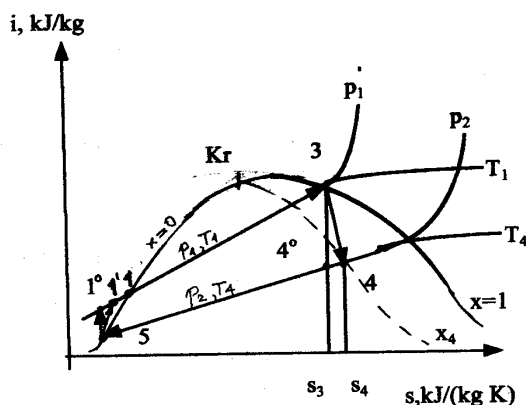


Sl. 8. Kogeneracioni sistem u Toyo Smelter<sup>23</sup>, SUMITOMO METAL MINING Co u Japanu.

Za hlađenje gasova iz peći za autogeno topljenje, koja se se gradi u Boru, predviđa se jedan utilizacioni parni kotao. On treba da proizvodi suvozasicenu vodenu paru pritiska 6,0 MPa. Ako se u termoenergetskom postrojenju odvija realan Rankine-Clausius-ov toplotni ciklus (promena stanja pare: 1', 3, 4, 5, 1'), njegova šema je prikazana na sl. 9, a i-s dijagram na sl. 10.



Sl. 9. Šema parnog bloka  
UPK- utilizacioni parni kotao,  
PT- parna turbina, G- generator, KP-  
kondenzator pare, NP- napojna pumpa



Sl. 10. i-s dijagram parnog bloka  
i- entalpija, s- entropija, p- pritisak,  
T- temperatura, x- suvoća pare  
Kr- kritična tačka [ $p_{kr}=22,115$  MPa,  
 $t_{kr}=374,12^\circ\text{C}$ ,  $v_{kr}=0,003147$  m<sup>3</sup>/kg,  
 $i_{kr}=2095,2$  kJ/kg,  $s_{kr}=4,4237$  kJ/(kg·K)].

<sup>22</sup> Ahlström Corporation Boilers Works, Reference List, Waste Heat Boilers for Metallurgical Plants pp 1-7, 1991.

<sup>23</sup> AKADA AKIHIKO, EFFECTIVE ENERGY UTILIZATION ON JAPANESE COPPER SMELTERS

Pritisak pare na ulazu u parnu turbinu ograničen je izdržljivošću materijala cevi parnog kotla i lopatica parne turbine i dozvoljenom vlažnošću pare u zadnjim stepenima turbine. Na visokim pritiscima pare pri konstantnoj temperaturi, krajnja tačka (stanje 4, sl. 10) širenja pare pada u oblasti sve manje suvoće pare ( $x$ , kg/kg), što prouzrokuje eroziona oštećenja lopatica zadnjih stepena parne turbine. Ograničenje suvoće pare je  $x=0,88-0,90$  kg/kg. Da bi se mogao povisiti pritisak, a da se ne pređe dozvoljena vlažnost, ide se na naknadno pregrevanje ili zagrevanje pare, tako da se stanje pare posle ekspanzije pomera u desno (prikazano u  $i$ -s dijagramu, sl. 10) i time se izbegava pojava vlažnosti pare veće od dozvoljene (0,10-0,12 kg vlage/kg pare) [6].

Parametri izrađene pare (para na izlazu iz parne turbine) ne mogu da idu mnogo nisko, jer ako je pritisak u kondenzatoru nizak, dolaziće do problema u zaptivanju, a pri niskim pritiscima pare, povećava se specifična zapremina pare što iziskuje veliku površinu kondenzatora, čime se povećava cena koštanja postrojenja. Pri smanjenju završnog pritiska  $p_2$  od 0,01-0,03 MPa termodinamički stepen korisnosti toplotnog ciklusa se povećava za oko 7,5%, pri nepromenjenim početnim parametrima pare. Kod savremenih velikih parnih turbina pritisak u kondenzatoru ( $p_2$ ) iznosi 0,0035-0,0040 MPa što odgovara temperaturi zasićenja 26-29°C.

Proizvedena para u utilizacionom parnom kotlu buduće peći za topljenje koncentrata bakra, iz tehnoloških razloga, je suvozasićena i može biti iskorišćena na više načina:

- za proizvodnju električne energije,
- nakon pregrevanja za proizvodnju električne energije,
- za tehnološke potrebe metalurgije bakra,
- za proizvodnju električne energije i tehnološke potrebe kombinovano.

Mogućnost korišćenja proizvedene suvozasićene pare zavisi od potrebe tehnološkog procesa i od želje potrošača. Na osnovu dosadašnje potrebe, para može da se koristi za zagrevanje mazuta za potrebe peći za topljenje i anodne peći, za potrebe sušenja koncentrata bakra, za tehnološke potrebe fabrike kiseonika. Nezavisno od toga, kao permanentan potrošač toplote se javlja elektrolitička rafinacija bakra za zagrevanje elektrolita, regeneracija elektrolita, zlatara i drugo.

Pri razmatranju navedenih mogućnosti korišćenja proizvedene pare u utilizacionom parnom kotlu peći za topljenje koncentrata u topionici u Boru mora se voditi računa da u letnjem periodu manje su potrebe za zagrevanje i klimatizaciju, a suprotno tome, u zimskom periodu potrebe za zadovoljenje toplifikacionih zahteva su daleko veće. S druge strane mora se imati na umu i sekundarna toplota, ukoliko se koriste, neki tehnološki procesi (na primer, proizvodnja sumporne kiseline, konvertovanje).

U industriji, gde se istovremeno u proizvodnom procesu koristi toplotna i električna energija, jedan od najefikasnijih načina snabdivanja energijom je zajednička proizvodnja toplotne i električne energije u kogeneracijskom paro-turbinskom postrojenju. Uz obnovljive izvore energije, kogeneracijska postrojenja su danas veoma poticani energetske sistemi. S obzirom da za potrebe snabdevanja baznog dela RTB-Bor toplotom potrebe su permanentne u grejnom i van grejnog perioda sa različitim intenzitetom, prednost se daje transformaciji sekundarne energije u toplotnu energiju. Ostatak sekundarne energije biće korišćena za proizvodnju električne energije. Za tu svrhu najpovoljnije je da, izgradnjom nove peći za topljenje, se koristi kogeneraciono postrojenje u kome će se spregnuto proizvoditi toplotna i električna energija.

Kogeneracija (često se koristi i izraz kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije - na nemačkom Blockheizkraftwerke, BHKW, odnosno na engleskom Combined Heat and Power, CHP) predstavlja proizvodnju električne energije sa istovremenim korišćenjem otpadne toplote, koja se inače gubi u industrijskim procesima. Principi kogeneracije poznati su već duže vreme, a

tehnologija se poboljšava i razvija već godinama. Danas, moderni kogeneracioni sistemi postižu efikasnost i do 90%. Kogeneracija nudi veliku fleksibilnost; najčešće postoji kombinacija postrojenja i goriva koja zadovoljava većinu individualnih zahteva.

Kogeneracija koristi otpadnu toplotu, koja uvek nastaje pri proizvodnji električne energije, čime se sprečava njeno ispuštanje u atmosferu. Prilikom konvencionalnih načina dobijanja električne energije, gotovo dve trećine energetskeg inputa se gubi na ovaj način! Kogeneracija može da iskoristi većinu te (inače bačene) toplotne energije, čime se dobija znatno bolja iskorišćenost goriva i značajne uštede, što sve rezultira u energetskej uštedi od 20 do 40%. Efikasnost kogeneracije određuje se poređenjem sa referentnim sistemom za pojedinačnu proizvodnju električne i toplotne energije. Referentni sistem je postojeći sistem odvojene proizvodnje električne energije u elektrani na ugalj (lignit) i toplotne energije iz kotlova na zemni gas, umanjujući efikasnost proizvodnje za visinu gubitaka u prenosnoj i distributivnoj mreži do krajnjeg korisnika. Veliki gubici koji nastaju u energetskim postrojenjima, odnosno termoelektranama naterali su nas da počnemo razmišljati kako povećati ukupnu iskoristivost postrojenja. U nekakvoj prosečnoj termoelektrani na ugalj iskoristivost postrojenja se kreće od 35-40%. Dakle više od polovine energije nepovratno trošimo, što kroz hlađenje i kondenzaciju, što kroz gubitke u samom sistemu. Energija koja se gubi u kondenzatoru termoelektrana predstavlja najveći deo ukupne neiskorišćene energije. Da bismo nekako iskoristili tu energiju, odnosno eksergiju goriva (ili drugih izvora toplote), primjenjujemo tako zvane kogeneracijska postrojenja. Kogeneracija (Combined Heat and Power ili CHP) je sekvencijalno korišćenje primarne energije goriva za proizvodnju dvaju korisnih energetskih oblika: toplotne energije i mehaničkog rada. Pritom se dobijeni mehanički rad najčešće koristi za proizvodnju električne energije, dok se toplotna energija može koristiti u raznim tehnološkim procesima, procesima grejanja te u procesima hlađenja. Efikasnost kogeneracije iznosi od 70-85% (od 27-45% električne energije i od 40-50% toplotne energije), za razliku od konvencionalnih elektrana gde je ukupna efikasnost od 30-51% (električne energije).

Prednosti kogeneracijskog postrojenja pred klasičnim postrojenjima s odvojenom snabdevanjem raznih oblika energije proizlaze pre svega iz visoke efikasnosti kogeneracijskih postrojenja. Pri tom treba istaknuti da je ovakav stepen iskoristivosti kogeneracijskog postrojenja svojstven režimu rada pri kojem se utroši sva toplotna energija proizvedena u postrojenju. Direktna posledica visoke efikasnosti kogeneracijskih postrojenja niske su vrednosti emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu pri njihovom radu.

Za kogeneracijska paro-turbinska postrojenja mogu se primjenjivati protivpritisne parne turbine ili kondenzacijske turbine s regulisanim oduzimanjem pare. Postrojenja s protivpritisnim parnim turbinama su najjednostavnija i energetski najefikasnija parno-turbinska postrojenja. Međutim, kod njih proizvodnja električne energije zavisi od potrebe toplotne energije. Kada nema potrošnje toplotne energije ne može se proizvoditi električna energija. S protivpritisnim turbinama zadovoljava se potreba za toplotnom energijom, a u slučaju manjka, električna se energija preuzima iz eksterne elektroenergetske mreže, dok se u slučaju viška isporučuje u elektroenergetsku mrežu. Postrojenja s kondenzacijskim turbinama uz regulisana oduzimanja pare su složenija i manje efikasna u odnosu na postrojenja s protivpritisnim turbinama. Međutim, u njima se može proizvoditi toplotna i električna energija i u slučajevima kada nema potrebe za toplotnom energijom. Ovakva se postrojenja obično ugrađuju kada se želi iz sopstvenih izvora snabdevati s potrebnom toplotnom i električnom energijom, bez zavisnosti od javne elektroenergetske mreže.

Sve veće potrebe za električnom i toplotnom energijom i veoma intenzivna eksploatacija fosilnih goriva, uz porast cena energenata, a naročito prirodnog gasa, postavljaju u tržišnim uslovima sve veće zahteve poslovanja elektroprivrednim kompanijama u pogledu energetske efikasnosti, fleksibilnosti i pouzdanosti rada gasno-parnih postrojenja, štednje goriva, zaštite životne sredine i što nižih proizvodnih cena električne i toplotne energije iz kombinovane proizvodnje. Ovde se izlažu tehnike povećanja energetske efikasnosti gasno-parnog bloka i metode tarifikacije kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije planirane izgradnje novog

parnog bloka u RTB-Bor u Boru koji će proizvoditi električnu energiju za sopstvene potrebe, a u kogeneraciji tokom grejne sezone će isporučivati toplotnu energiju za potrebe toplifikacionog sistema baznog dela RTB-Bor (možda i grada), dok će se u kondenzacionom režimu u letnjem periodu proizvoditi kombinovano više električne energije, manje toplote. Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije u kogeneraciji nudi 3 značajne prednosti nad konvencionalnim autonomnim tehnologijama za proizvodnju električne i toplotne energije: povećanje efikasnosti u energetskej transformaciji, ušteda goriva i znatno niže zagađenje životne sredine.

Ako se uporede efekti korišćenja sekundarne energije u topionici bakra u Boru sa efektima sagorevanja mrkog uglja „Resavica“ granulacije 10 do 30 mm, ukupne vlage 19,97%, pepeo 20,76%, sagorivi sumpor 0,29% S, 43,30% C, 3,68% H, 12,00%O, 1,00%N, gornja toplotna moć  $H_g=17.477$  kJ/kg, donja toplotna moć  $H_d=16.488$  kJ/kg i cene u 2023. godine 17.000 RSD/t. Sagorevanjem ovog uglja dobijaju se gasoviti produkti  $5,085$  m<sup>3</sup><sub>n</sub>/kg<sub>uglja</sub> sastava: 15,20%CO<sub>2</sub>, 0,04%SO<sub>2</sub>, 4,86%O<sub>2</sub>, 67,71%N<sub>2</sub> i 4,86%O<sub>2</sub>. Za dobijene toplote sagorevanjem pomenutog uglja, pri energetske efikasnosti sagorevanja i prenos toplote od 97%, od 1,0 MW<sub>th</sub> potrebno je da sagori 225,093 kg uglja. Na osnovu tabele 7, sa gasovitim produktima odlazi toplota 17.131,49 kW<sub>t</sub>, što je ekvivalentno sagorevanju 1,539 kg/s uglja „Resavica“. Osim uštede toplote korišćenjem toplote iz procesa topljenja koncentrata bakra u Fleš peći sledi i manje zagađenje okoline, jer ne sagoreva ugalj, a i ne ispuštaju se gasovi u okolinu Bora u količini od 5,085 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/kg uglja, sastava pomenutog u ovom poglavlju.

Na osnovu tabele 7, sa gasovitim produktima Fleš peći odlazi toplota u iznosu od 17.131,49 sa poletinom 544,09 kW<sub>t</sub>, od hemijskih reakcija 2.266,67 kW<sub>t</sub> i gubici toplote 830,00 kW<sub>t</sub>, a na osnovu tabele 8, proizvedena para u ulizacionom parnom kotlu sadrži toplotu 20,98 MW<sub>t</sub>. Za godinu dana rada Fleš peći od 330 dana, po 24 h/dan, korišćenjem te energije manje se potroši ekvivalent uglja „Resavica“, kod efikasnosti parnih kotlova od 75%, za 49.748,125 t<sub>uglja</sub>/godišnje.

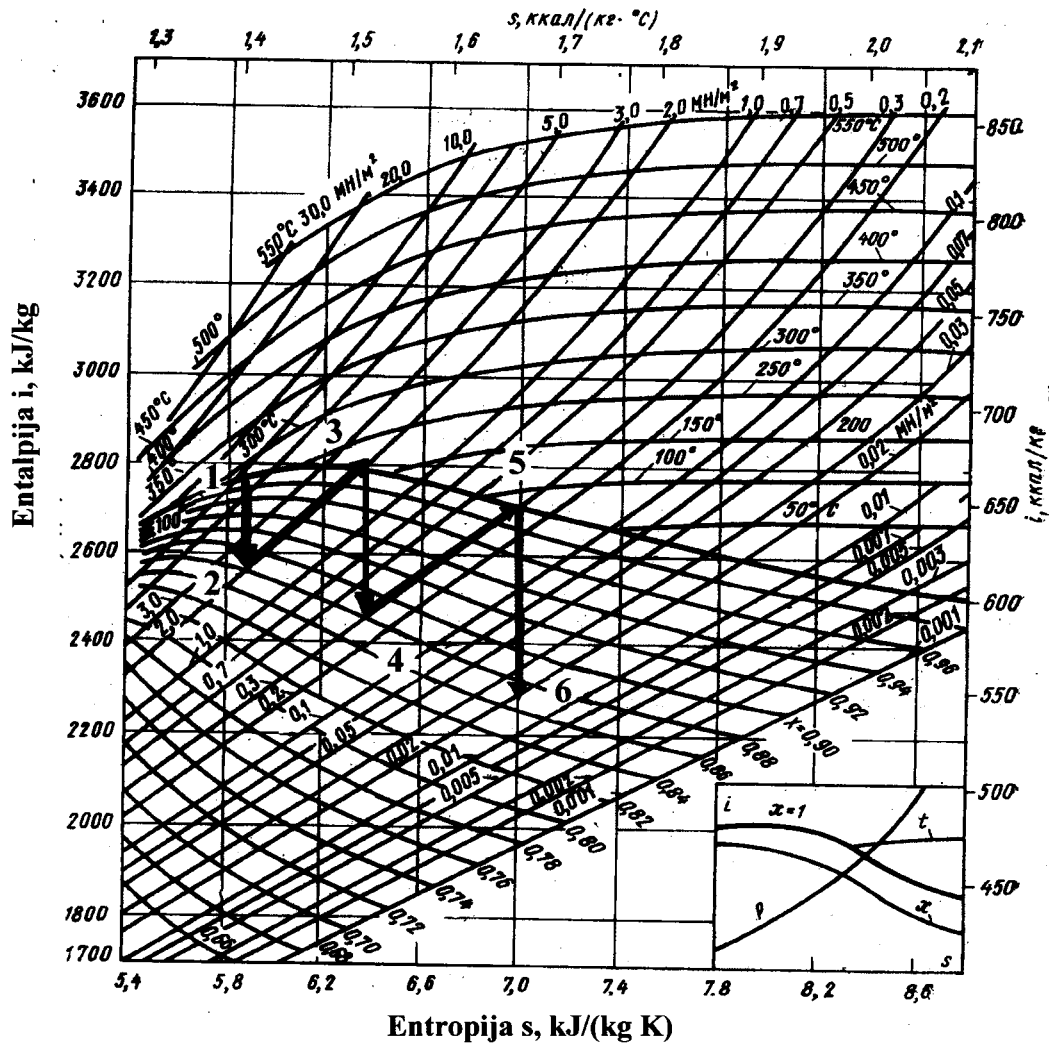
Najveća proizvodnja anodnog bakra<sup>24</sup> je ostvarena 1990. godine u količini 174.257 t<sub>ab</sub>, pri tome je prerađeno koncentrata bakra na liniji broj 1, sveden na siuvu masu, 292.010 t<sub>sk</sub> i ostvarena je specifična potrošnja uglja 0,1445 t<sub>uglja</sub>/t<sub>sk</sub>, a na liniji broj 2 prerađena je količina suvog koncentrata 317.875 t<sub>sk</sub> i ostvarena je specifična potrošnja mazuta 0,0907 t<sub>mazuta</sub>/t<sub>sk</sub>, potrošnja električne energije, za celu topionicu, 696,467 kWh/t<sub>ab</sub> i ostvarena specifična potrošnja mazuta na plamenoj rafinaciji bakra 0,0204 t<sub>mazuta</sub>/t<sub>ab</sub>. Najveća proizvodnja katodnog bakra u elektrolizi je ostvarena 1990. godine u iznosu od 151.395,249 t<sub>kb</sub> i pri tome je ostvarena specifična potrošnja električne energije 387,906 kWh/t<sub>kb</sub> i specifična potrošnja pare 0,568 t<sub>pare</sub>/t<sub>kb</sub>.

Najveća proizvodnja pregrejane pare u topionici je ostvarena 1976. godine i to: u ulizacionom parnom kotlu br. 1 (UK-1) iza plamene peći broj 1 u količini od 194.394 t<sub>pare</sub> ili 0,9724 t<sub>pare</sub>/t<sub>sk</sub>, u ulizacionom parnom kotlu konvertora (UK-2) 10.958 t<sub>pare</sub> i u ulizacionim parnim kotlovima iza plamene peći broj 2 (UK-3 i 4) 183.038 t<sub>pare</sub> ili 0,7385 t<sub>pare</sub>/t<sub>sk</sub> u isto vreme iz proizvedene pare u topionici isporučena je para Termoelektrani RTB Bor 275.980 t<sub>pare</sub> ili 0,7106 t<sub>isporučene</sub> pare TE/t<sub>proizvedene</sub> pare u topionici.

<sup>24</sup> Mitovski M. Potrošnja energenata u TIR-u za period 1984. do 2009. godine, RTB Bor, Bor 2009.

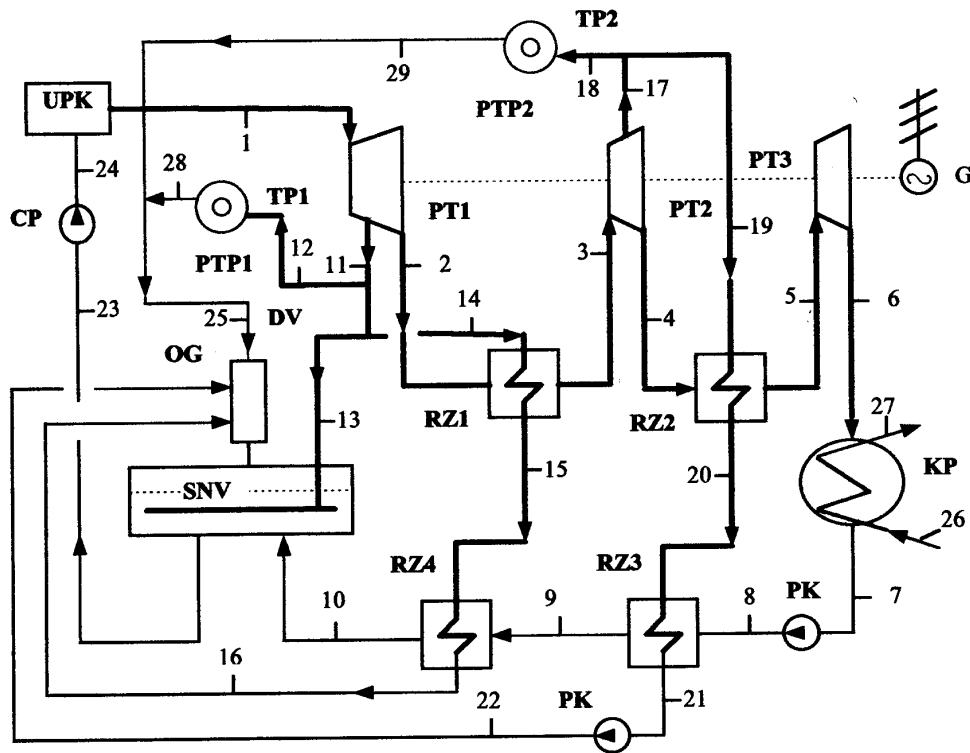
#### 4.0. IZBOR TOPLOTNOG CIKLUSA ZA ISKORIŠĆENJE SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLLOTNE ENERGIJE FLASH PEĆI

Korišćenje paroturbinskog postrojenja u Topionici koje će proizvoditi toplotu za potrebe baznog dela RTB-Bor Grupe i električnu energiju u trostepenoj kondenzacionoj parnoj turbini u kojoj će ekspandirati suvozasiceana para. U ovom slučaju, u sklopu Topionice, treba ugraditi toplotne razmenjivačke stanice sa potrebnim pumpama za transport vrele vode i priključivanje na postojeći vrelvodni sistem.



Sl. 11. Toplotni ciklus koji se odvija u turboagregatu (sl. 12) prikazan u i-s dijagramu sa prikazanom promenom stanja pare u parnoj turbini (tačke stanja: 1, 2, 3, 4, 5 i 6)

Na osnovu sagledavanja potrošnje tehnološke pare u pogonima TIR-a nakon modernizacije topionice, s obzirom da je smanjen kapacitet proizvodnje bakra, realna instalisana snaga, mogla bi biti 50 MW<sub>t</sub>, a kako je srednja temperatura u grejnom periodu 3,5°C, angažovana snaga iznosi 24 MW<sub>t</sub>. U periodu van grejne sezone realna instalisana snaga je oko 8 MW<sub>t</sub> i srednja temperatura okolnog vazduha 17,35°C. Realna angažovana snaga može da se uzme da iznosi van grejne sezone 8 MW<sub>t</sub>. Prevedeno na količnu pare pritiska 0,7 MPa i temperature 164,96°C (stanje 18, sl. 11), a hlađenje pare se vrši do kondenzata temperature 120°C (stanje 29, sl. 11), konačna njena potrošnja iznosi 12,909 t/h pare pritiska za potrebe postojeće Fabrike kiseonika, zagrevanje mazuta i pogona elektrolitičke rafinacije bakra, zlatare i regeneracije elektrolita.



**Sl. 12. Šema hipotetičkog paroturbinskog postrojenja**

UPK- utilizacioni parni kotao, PT1- stepen parne turbine visokog pritiska, PT2- stepen parne turbine srednjeg pritiska, PT3- stepen parne turbine niskog pritiska, KP- kondenzator pare, G- generator električne energije, SNV- spremnik napojne vode, PK- pumpa za kondenzat, CP- cirkulaciona pumpa, RZ rekuperativni zagrejač, OG- odgasivač, TP1- tehnološka para pritiska 2,0 MPa, TP2- tehnološka para pritiska 0,7 MPa, DV-dopunska voda (kondenzat sa 120°C), PTP- potrošač tehnološke pare

S obzirom da, za tehnološka zagrevanja niskotemperaturnom toplotom i pripremu tople potrošne vode, se koristi kondenzaciona parna turbina sa dva regulisana oduzimanja pare. Para pritiska 6,0 MPa najpre ekspandira izentropski u visokopritisnom delu parne turbine (PT1) do pritiska 1,9 MPa (stanje 2, sl. 12), a u tom delu turbine oduzima se para pritiska 2,0 MPa za potrebe za sada neidentifikovanih potrošača (stanje 12), zatim izrađena para se zagreva izobarno u rekuperativnom zagrejaču RZ1 do zasićenja (stanje 3). Suvozasícena para (stanja 3) pritiska 1,9 MPa izentropski ekspandira u delu srednjeg pritiska parne turbine (PT2) do pritiska 0,30 MPa (stanje 4). U tom delu se oduzima potrebna tehnološka para pritiska 0,700 MPa i temperature 164,96 °C za potrebe Fabrike kiseonika, zagrevanje mazuta, elektrolitičke rafinacije bakra, zlatare i regeneraciju elektrolita (stanje 18). Ostatak pare pritiska 0,30 MPa (stanje 19) se zagreva u rekuperativnom zagrejaču RZ2 do temperature 190°C (oblast pregrejane pare, stanje 5) pregrejana para ekspandira izentropski do pritiska 0,020 MPa (stanje 6). Produkcija pare je 34,459 t/h, a količina gasova za tu produkciju 38.810 m<sup>3</sup> /h.

Šema hipotetičkog paroturbinskog postrojenja, u kome se odvija toplotni ciklus prikazan na sl. 11, kao moguće prihvatljiv za uslove TIR-a, je prikazana na sl. 12.

Proizvedena suvozasícena para pritiska 6,0 MPa u količini  $m_1$ , kg/kg ekspandira u visokopritisnom delu parne turbine (PT1), drugi deo  $m_{13}$  ide u spremnik napojne vode (SNV) za dogrevanje napojne vode do 140°C i  $m_{12}$  ide u potrošnju (TP1). Izrađena para mase  $m_2$  pritiska 1,9 MPa zagreva se do krive zasićenja ( $x=1,0$  kg/kg) u regenerativnom zagrejaču RZ1. Para količine  $m_3$ , kg/kg sveže pare stanja 3 na sl. 12 ekspandira u delu parne turbine srednjeg pritiska (PT2) do

pritiska 0,30 MPa i  $x=0,88$  kg/kg. Izrađena para iz dela turbine srednjeg pritiska zagreva (stanja 19) se u regenerativnom zagrejaču RZ2 do gornje granične krive ( $x=1,0$ ), a onda ekspandira u niskopritisnom delu parne turbine (PT3) do pritiska 0,020 MPa. Izrađena para zatim kondenzuje u kondenzatoru (KP), kondenzat se komprimuje na pritisku 1,5 MPa, zatim zagreva u regenerativnim zagrejačima RZ3 i RZ4 i dovodi u spremnik napojne vode (SNV). Napojna voda iz spremnika pomoću cirkulacione pumpe (CP) dovodi se u utilizacioni parni kotao. Drugi deo pare (stanja 18) služi za toplifikacione svrhe (leti angašovane toplotne snage od 8 MW<sub>t</sub>), a u grejnoj sezoni para stanja 17 koristi se isključivo za toplifikacione svrhe).

**Veličine stanja fluida paroturbinskog postrojenja (prema sl. 11)**

**TABELA 10.**

STANJE FLUIDA (sl. 8)	UČEŠĆE <sup>25</sup> , kg/kg sveže pare <sup>+</sup>	PRITISAK p, MPa	TEMPERATURA t, °C	STEPEN SUVOĆE, x, kg/kg	ENTALPIJA i, kJ/kg	ENTROPIJA s, kJ/(kg·K)	EKSERGIJA e, kJ/kg <sup>*</sup>
1	1,0000	6,000	275,56	1,0000	2783,30	5,8878	1060,152
2	0,8482	1,900	209,79	0,8800	2568,40	5,8878	845,252
3	0,8482	1,900	209,79	1,0000	2797,26	6,3579	936,302
4	0,4229	0,300	133,54	0,8800	2465,80	6,3579	604,842
5	0,4229	0,300	133,54	1,00	2725,50	6,9930	678,362
6	0,4229	0,020	60,09	0,8705	2304,22	6,9930	257,082
7	0,4229	0,020	60,09	voda	251,58	0,8310	10,833
8	0,4229	1,500	60,09	voda	252,30	0,8302	11,787
9	0,4229	1,500	64,77	voda	271,20	0,8891	13,421
10	0,4229	1,500	100,00	voda	420,10	1,3058	40,165
11	0,1518	2,000	212,37	0,9177	2641,95	6,0171	880,897
12	0,0000	2,000	212,37	0,9177	2641,95	6,0171	880,897
13	0,0432	2,000	212,37	0,9177	2641,95	6,0171	880,897
14	0,1086	2,000	212,37	0,9177	2641,95	6,0171	880,897
15	0,1086	2,000	190,00	voda	807,90	2,2345	155,717
16	0,1086	2,000	150,00	voda	633,10	1,8399	96,594
17	0,4253	0,700	164,96	0,9952	2734,98	6,6851	778,103
18	0,3746	0,700	164,96	0,9952	2734,98	6,6851	778,103
19	0,0507	0,700	164,96	0,9952	2734,98	6,6851	778,103
20	0,0507	0,700	121,00	voda	504,06	1,5271	59,251
21	0,0507	0,700	80,00	voda	335,52	1,0747	23,332
22	0,0507	1,500	80,00	voda	336,10	1,0743	24,029
23	1,0000	1,160	140,00	voda	589,71	1,7381	83,046
24	1,0000	7,000	140,00	voda	593,40	1,7321	88,022
25	0,3746	2,000	120,00	voda	505,00	1,5260	60,513
26	20,767	0,300	29,00	voda	121,72	0,4228	0,636
27	20,767	0,300	39,00	voda	163,52	0,5584	2,685
28	0,0000	2,000	120,00	voda	505,00	1,5260	60,513
29	0,3746	2,000	120,00	voda	505,00	1,5260	60,513

<sup>\*</sup>) Uzeti su atmosferski uslovi  $T_0=293,15$  K i  $p_0=0,10$  MPa, a za vodu su [3]:  $i_0=84$  kJ/kg i  $s_0=0,2963$  kJ/(kg·K).

Jednačina za izračunavanje fizičke eksergije vode i vodene pare je:  $e= i-i_0-T_0(s-s_0)$ , kJ/kg

<sup>+</sup>) Sveža para je proizvedena para u utilizacionom parnom kotlu (stanja 1, sl. 12)

Za određivanje veličine stanja radnog fluida (para-voda), u paroturbinskom postrojenju (parnom bloku) sl. 12, uzeto je u obzir sledeće:

<sup>25</sup> Proizvodnja sveže pare (stanja 1) iznosi:  $D=34,459$  t/h ili  $d_s=9,572$  kg/s

1. Stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora obično se ne nalazi na donjoj graničnoj liniji ( $x=0$ ), već u području vode, jer je najčešće podhlađen za 0,1 do 0,2°C;

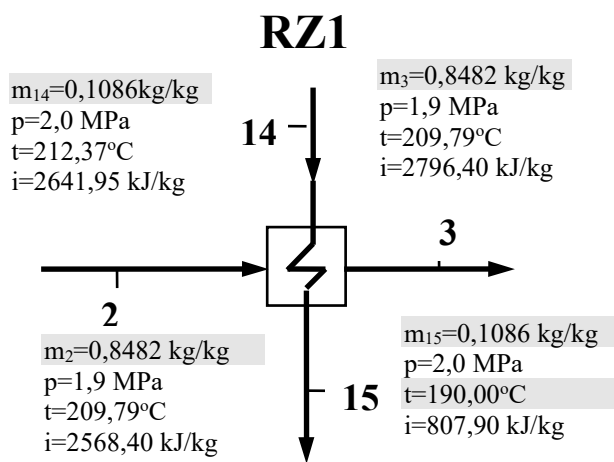
2. Za proračun toplotne šeme neophodno je poznavanje unutrašnjeg stepena korisnosti parne turbine, odnosno njenih odvojenih stepena i pojedinih grupa stepena. Radi tačnijeg određivanja procesa ekspanzije pare od stanja pare ispred parne turbine do pritiska kondenzacije neophodno je uzimati u obzir: gubitke u ventilima na ulazu u parnu turbinu, stepen korisnosti regulacionog sistema, stepen korisnosti ostalih grupa stepena, gubitke na izlazu iz parne turbine koji uključuju gubitke od izlazne brzine, gubitke u separatorima vlage, međupregrejačima i svim ostalim elementima između pojedinih turbina (na primer, u parovodima od turbine visokog do turbine niskog pritiska),

3. Pritisak napojne, to jest cirkulacione vode, treba da bude najmanje za 10% viši od pritiska spremnika napojne vode, odnosno doboša parnog kotla;

4. Gubitak pare ili kondenzata nadoknađuje se dobavnom vodom. Realno je očekivati da količina dobavne vode, za nadoknađivanje unutrašnjih gubitaka toplotnositelja (para ili voda), kod savremenih kondenzacionih turbopostrojenja iznose 0,8-1,5%, a kod termoelektrana do 2,5% opštih rashoda sveže pare na parnoj turbini;

5. Toplotni bilans paroturbinskog postrojenja i pojedinih elemenata tog postrojenja.

Proračun toplotne šeme paroturbinskog postrojenja, prikazanog na sl. 12, izvršiće se na osnovu toplotnog i materijalnog bilansa svakog uređaja posebno. Za tu svrhu usvaja se: stepen korisnosti svih rekuperativnih zagrejača da je  $\eta_{RZ}=0,97$ , da je pothlađivanje fluida do stanja 10 do 100°C, pad pritiska u instalacijama i uređajima je, za ovu priliku, zanemaren.



Jednačina toplotnog bilansa rekuperativnog zagrejača RZ1 glasi:

$$\eta_{RZ1} \cdot m_{14}(i_{14}-i_{15})=m_2(i_3-i_2). \quad (2)$$

Ako se izdvoji  $m_2$  kao nepoznata veličina

$$m_2=\eta_{RZ1} \cdot \frac{i_{14}-i_{15}}{i_3-i_2} m_{14}, \text{ kg/kg}. \quad (3)$$

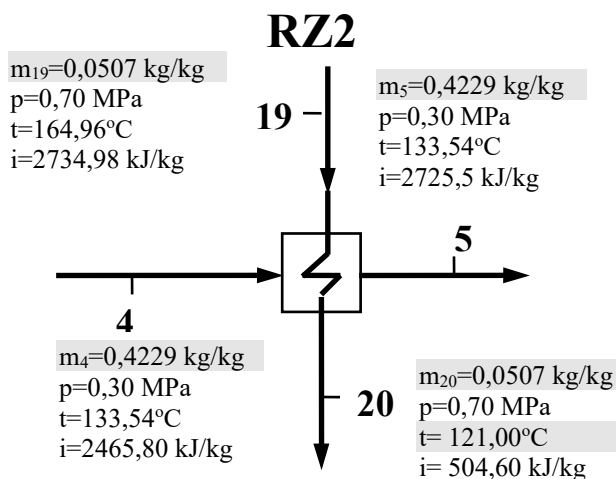
Zamenom vrednosti u jednačini (3) dobija se da je:

$$m_2=0,97 \frac{2641,95-807,90}{2796,40-2568,40} m_{14}=7,803 m_{14}. \quad (3')$$

$$m_{14}=0,128 m_2 \text{ kg/kg}.$$

Sl. 13. Šema rekuperativnog zagrejača RZ1





Jednačina toplotnog bilansa rekuperativnog zagrejača RZ2 glasi:

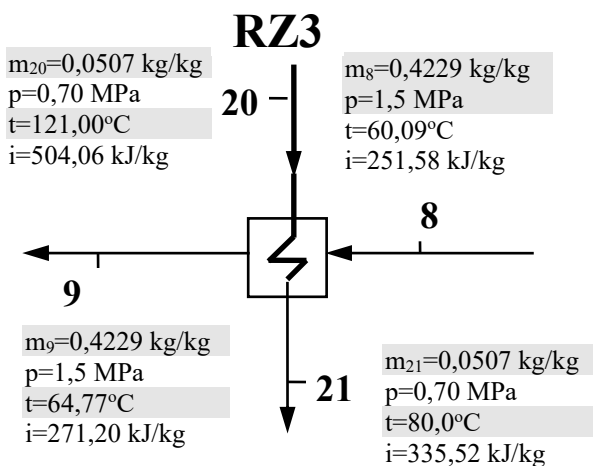
$$\eta_{RZ2} \cdot m_{19}(i_{19}-i_{20})=m_4(i_5-i_4). \quad (4)$$

Ako se uzme da je nepoznata veličina  $m_5$ ,

$$m_{19}=\frac{i_5-i_4}{\eta_{RZ2}(i_{19}-i_{20})} m_4, \text{ kg/kg} \quad (5)$$

$$m_{19}=\frac{2725,5-2465,80}{0,97(2734,98-504,06)} m_4=0,120 m_4. \quad (5')$$

Sl. 14 Šema rekuperativnog zagrejača RZ2



Kod rekuperativnog zagrejača RZ3 nije poznata entalpija u tački 9 ( $i_9$ ). Na osnovu sl. 15 jednačina toplotnog bilansa glasi:

$$\eta_{RZ3} \cdot m_{20}(i_{20}-i_{21})=m_8(i_9-i_8) \quad (6)$$

pa je

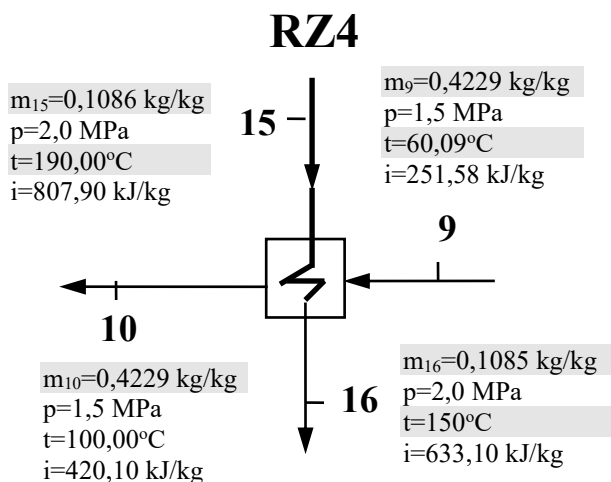
$$i_9=i_8 + \frac{\eta_{RZ3} \cdot (i_{20}-i_{21}) m_{20}}{m_8}, \text{ kJ/kg},$$

a kako je, prema jednačini (5'),  $m_{20}/m_8=m_{19}/m_4=0,120$ , tada je:

$$i_9=251,58+0,97(504,06-335,52)0,120=271,20 \text{ kJ/kg}$$

i odgovara temperatura kondenzata  $64,77^\circ\text{C}$  [3].

Sl. 15. Šema rekuperativnog zagrejača RZ3



Entalpija vode u tački 10 ( $i_{10}$ ) rekuperativnog zagrejača RZ4 (sl. 12 i 16) može da se odredi pomoću toplotnog bilansa (vidite sl. 16)

$$\eta_{RZ4} \cdot m_{15}(i_{15}-i_{16})=m_9(i_9-i_{10}). \quad (7)$$

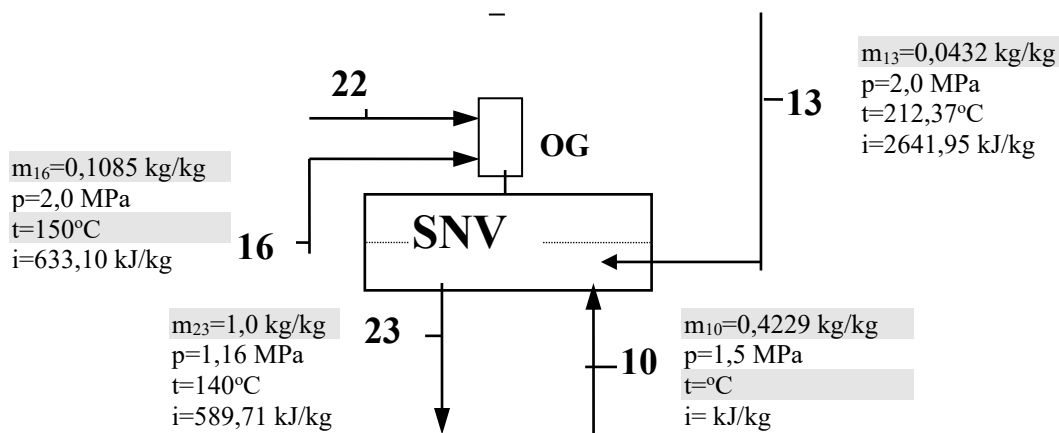
ili

$$i_{10}=i_9 + \frac{\eta_{RZ4} \cdot (i_{15}-i_{16}) m_{15}}{m_9}, \text{ kJ/kg}.$$

Radi usaglašavanja sa ostalim parametrima, usvaja se temperatura vode  $t_{10}=100^\circ\text{C}$ , za koju je entalpija  $i_{10}=420,10 \text{ kJ/kg}$ .

Sl. 16. Šema rekuperativnog zagrejača RZ4





**Sl. 17. Šema spremnika napojne vode sa odgasivačem**

Na osnovu materijalnog i toplotnog bilansa spremnika napojne vode (SNV), sl. 17 dobija se sistem dve jednačine sa dve nepoznatim ( $m_2$  i  $m_4$ ):

$$m_{23}=m_{13}+m_{10}+m_{16}+m_{22}+m_{25} \quad (8)$$

S obzirom da su:  $m_{23}=1,0 \text{ kg/kg}$ ,  $m_{10}=m_4$ ,  $m_{13}=m_1-m_2-m_{14}=1-1,128 m_2$ ,  $m_{22}=m_{19}=0,120 m_4$ ,  $m_{25}=m_{29}=0,3746 \text{ kg/kg}$ , usv  $m_{28}=0$  –nema potrošnje pare tih parametara,  $m_{18}=0,3746 \text{ kg/kg}$  sveže pare,  $m_1=1,0 \text{ kg/kg}$  sveže pare, dobija se da je

$$m_2=1,120 m_4+0,3746. \quad (9)$$

Na osnovu toplotnog bilansa spremnika napojne vode

$$m_{23} i_{23}= m_{13} i_{13}+m_{10} i_{10}+m_{16} i_{16}+m_{22} i_{22}+m_{25} i_{25}, \quad (10)$$

zamenom vrednosti za masu i entalpiju, dobija se:

$$1,0 \cdot 589,71=(1,0-1,128 \cdot m_2) \cdot 2641,95+(m_2-0,3746-0,120 \cdot m_4) \cdot 420,10+0,128 \cdot m_2 \cdot 633,10+0,120 \cdot m_4 \cdot 336,10+0,3746 \cdot 504,06, \text{ tj.}$$

$$2124,032-2478,983 m_2 - 50,412 m_4=0 \quad (11)$$

Zamenom vrednosti za  $m_2$  (jednačina 9), dobija se da je:

$$m_4=0,42287 \text{ kg/kg sveže pare (stanja 1, tab. 10).}$$

#### 4.1. ISKORIŠĆENJE SUVOZASIĆENE PARE PRITISKA 6,0 MPa I TEMPERATURE NAPOJNE VODE 140°C U KONDENZACIONOJ PARNOJ TURBINI

Suvozasićena para, koja se proizvodi u utilizacionom parnom kotlu, pritiska 6,0 MPa, može da se koristi za proizvodnju električne energije u kondenzacionom paroturbinskom postrojenju i za proizvodnju toplotne energije za toplifikaciju i za tehnološke potrebe. U ovom slučaju temperatura napojne vode utilizacionog parnog kotla je uzeta da je  $t_w=140^{\circ}\text{C}$ . Šema parnog bloka je prikazana na sl. 12, a parametri radnog fluida (tela), na osnovu i-s dijagrama (sl. 11) i proračuna, prikazani su u tabeli 10.

Proračun količina fluida uradiće se na osnovu sl. 12. do 17. i tab. 10.

#### 4.1.1. SNAGA I EFIKASNOST PARNE TURBINE

Za određivanje glavnih termodinamičkih parametara, koji pokazuju kakav je kvalitet postrojenja i parnog bloka u transformaciji energije, potrebno je definisati izvesne gubitke eksergije i rada. Ovi gubici su najčešće posledica nepovratnosti procesa. Za definisanje ovih gubitaka potrebno je postaviti kontrolnu granicu oko parne turbine, turboagregata ili onog dela parnog bloka čiji se gubici razmatraju.

Rad koji para preda rotoru u samoj turbini po masi od 1 kg pare, kao radno telo, naziva se specifični rad. Kako je praktičnije računati sa tehničkim radovima, pod ovim radom se uvek podrazumeva tehnički rad. Prema tome, specifični unutrašnji rad  $l_{uPT}$  je tehnički rad koji radno telo preda rotoru u parnoj turbini. Proces u parnoj turbini ne može biti povratan (reverzibilan), jer pri strujanju pare nastaju gubici. Radi upoređivanja stvarnog dobijenog unutrašnjeg rada izabira se konvencijom neki povratni proces, pri kojem se sigurno dobija veći rad. Obično je to izentropski (adijabatski,  $pv^k = \text{konst.}$ ) proces, pa se onda rad koji se dobija pri ovakvom procesu naziva specifični izentropski rad  $l_{iPT}$ .

Upoređenjem specifičnog unutrašnjeg rada može se zaključiti koliko stvarni toplotni proces



u parnoj turbini odstupa od povratnog izentropskog procesa. Mogu se dakle proceniti takozvani unutrašnji gubici u parnoj turbini koji nastupaju kao posledica odstupanja od izentropskog procesa. Ovim upoređivanjem definiše se unutrašnji izentropski stepen korisnosti kao odnos stvarnog dobijenog specifičnog rada u parnoj turbini (dobijene snage  $N_{uPT}$ ) i specifičnog rada koji bi se u parnoj turbini dobio pri izentropskom procesu širenja (izentropske snage  $N_{iPT}$ ). Unutrašnji izentropski stepen korisnosti parne turbine dakle je:

$$\eta_{iPT} = l_{uPT} / l_{iPT} = N_{uPT} / N_{iPT}. \quad (12)$$

Kod parnih turbina izentropski stepen korisnosti se kreće u granicama  $\eta_{iPT} = 0,85 - 0,90$ .

Specifični tehnički rad kod odvijanja realnog toplotnog pada procesa može se izračunati iz stvarne promene specifične entalpije (sl. 10), pa je:

**Sl. 18. Presek parne turbine**

$$l_{uPT} = i_3 - i_4, \text{ kJ/kg sveže pare}, \quad (13)$$

a specifični izentropski tehnički rad, koji se još u termodinamici zove izentropski toplotni pad, može se izračunati iz izentropske promene specifične entelpije:

$$l_{iPT} = i_3 - i_4^{\circ} = \Delta h_i, \text{ kJ/kg sveže pare}. \quad (14)$$

Posmatrajući šemu hipotetičkog paroturbinskog postrojenja, koja je prikazana na sl. 16, i odvijanje toplotnog ciklusa, prikazan u i-s dijagramu na sl. 15, specifični izentropski rad  $l_{iPT}$  i specifična izentropska snaga parne turbine ( $n_{iPT}$ ), kada je pritisak sveže suvozasicene pare 6,0 MPa, i pri izentropskoj ekspanziji pare, određuje se prema izrazima (15a i 15b).

$$l_{iPT} = m_2(i_1 - i_2) + m_{11}(i_1 - i_{11}) + m_4(i_3 - i_4) + m_{17}(i_3 - i_{17}) + m_5(i_5 - i_6), \text{ kJ/kg sveže pare}, \quad (15a)$$

$$n_{iPT} = \frac{m_2(i_1-i_2) + m_{11}(i_1-i_{11}) + m_4(i_3-i_4) + m_{17}(i_3-i_{17}) + m_5(i_5-i_6)}{3600}, \text{ kWh/kg sveže pare.} \quad (15b)$$

Zamenom vrednosti iz tabele 10. u jednačini (15a i 15b) dobija se specifični izentropski rad parne turbine da je:

1. U visokopritisnom stepenu parne turbine (PT1, sl. 12)  $l_{iPT1} = m_2(i_1-i_2) + m_{11}(i_1-i_{11}) = 0,8482(2783,30-2568,40) + 0,1518(2783,30-2641,95) = 203,735 \text{ kJ/kg}$  (ili specifična izentropska snaga  $n_{iPT1} = 0,0566 \text{ kWh/kg}$ ) sveže pare stanja 1 na sl. 12 (ili tab. 10);

2. U stepenu parne turbine srednjeg pritiska (PT2)  $l_{iPT2} = m_4(i_3-i_4) + m_{17}(i_3-i_{17}) = 0,4229(2797,26-2465,80) + 0,4253(2797,26-2734,98) = 166,662 \text{ kJ/kg}$  (ili  $n_{iPT2} = 0,0463 \text{ kWh/kg}$ ) sveže pare stanja 1 na sl. 12.

3. U niskopritisnom stepenu parne turbine (PT3)  $l_{iPT3} = m_5(i_5-i_6) = 0,4229(2725,26-2734,98) = 178,159 \text{ kJ/kg}$  ( $n_{iPT3} = m_5(i_5-i_6)/3600 = 0,4229(2725,26-2734,98)/3600 = 0,0495 \text{ kWh/kg}$ ) sveže pare stanja 1 na sl. 12.

Prema tome, parna turbina raspolaže sa specifičnim izentropskim radom, na osnovu jednačine (15a), sa  $l_{iPT} = 548,556 \text{ kJ/kg}$  (to jest, specifična izentropska snaga  $0,1524 \text{ kWh/kg}$ ) sveže pare stanja 1 na sl. 12. Izentropska snaga parne turbine, za produkciju pare, prema tab. 10,  $d_s = 9,572 \text{ kg/s}$  ( $D = 34,459 \text{ t/h}$ ) iznosi  $N_{iPT} = 548,556 \cdot 9,572 = 5.250,778 \text{ kW}$ , od toga: u visokopritisnom stepenu  $N_{iPT1} = 1.950,151 \text{ kW}$ , u stepenu parne turbine srednjeg pritiska  $N_{iPT2} = 1.595,289 \text{ kW}$  i u niskopritisnom stepenu  $N_{iPT3} = 1.705,338 \text{ kW}$ .

Ako se usvoji da izentropski stepen korisnosti u svim stepenima (i svim oklopima) parne turbine bude konstantan i usvoji  $\eta_{iPT} = 0,85$ , ukupni izentropski stepen korisnosti parne turbine na sl. 12, iznosi

$$\eta_{iPT} = \frac{m_2[(i_1-i_2) + m_{11}(i_1-i_{11})]\eta_{PT1} + m_4[(i_3-i_4) + m_{17}(i_3-i_{17})]\eta_{PT2} + m_5(i_5-i_6)\eta_{PT3}}{m_2(i_1-i_2) + m_{11}(i_1-i_{11}) + m_4(i_3-i_4) + m_{17}(i_3-i_{17}) + m_5(i_5-i_6)} = 0,85.$$

Po definiciji o izentropskom stepenu korisnosti parne turbine (jednačina (12) brojilac predstavlja stvarni tehnički rad i on za parnu turbinu sa sl. 12 iznosi  $l_{uPT} = 466,273 \text{ kJ/kg}$  sveže pare poz. 1, sl. 12 (ili specifična unutrašnja snaga  $n_{uPT} = 0,1295 \text{ kWh/kg}$  sveže pare) i to: u visokopritisnom delu parne turbine  $l_{uPT1} = 173,175 \text{ kJ/kg}$  sveže pare, u stepenu parne turbine srednjeg pritiska  $l_{uPT2} = 141,663 \text{ kJ/kg}$  i u niskopritisnom delu parne turbine  $l_{uPT3} = 151,435 \text{ kJ/kg}$  sveže pare.

Pored unutrašnjih gubitaka u parnoj turbini koji nastaju zbog nepovratnosti procesa, postoje i izvesni spoljni gubici. To su uglavnom gubici u ležištima. Naime rad koji je u parnoj turbini predat rotoru troši se delimično zbog trenja u ležištima. Specifični tehnički rad koji se preko spojnice parne turbine predaje radnoj mašini (ovde je na primer, elektrogenerator) je manji. Rad koji se preko spojnice parne turbine predaje naziva se efektivni specifični rad (oznaka  $l_{ePT}$ ) i to je tehnički rad koji se po jednom kilogramu pare dobio na spojnici turbine. Ovom radu odgovara efektivna snaga parne turbine  $N_{ePT} = m_{sp} \cdot l_{ePT}$ . Efektivna snaga parne turbine, u ovom slučaju je snaga koja se preko spojnice turbine predaje rotoru radne mašine (ovde, generatora).

Odnos efektivnog specifičnog rada i unutrašnjeg specifičnog rada definiše mehanički stepen korisnosti parne turbine

$$\eta_{mPT} = l_{ePT} / l_{uPT} \quad (\text{ili } = N_{ePT} / N_{uPT}). \quad (16)$$

Razlika unutrašnje snage i efektivne snage ( $N_{uPT}-N_{ePT}$ ) se pretvara u toplotu u jedinici vremena. Ova toplota se odvodi hlađenjem ležišta putem ulja, koje istovremeno služi za podmazivanje. Ulje se pak hladi rashladnom vodom. Time se ovaj gubitak rada zbog trenja u ležajevima predaje u obliku toplote okolini. Mehanički stepen korisnosti parnih turbina, kod izvedenih jedinica, se kreće u granicama  $\eta_{mPT}=0,97-0,995$ .

Ako je poznat mehanički stepen korisnosti parne turbine ( $\eta_{mPT}$ ) i unutrašnji izentropski stepen korisnosti ( $\eta_{iPT}$ ), onda se može odrediti efektivni specifični rad parne turbine pomoću jednačine

$$l_{ePT}=\eta_{mPT}\cdot l_{uPT}=\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot l_{iPT}, \text{ kJ/kg.} \quad (17)$$

Efektivna snaga parne turbine, ako je poznat protok na ulazu u turbinu- sveža para  $m_{sp}(\text{kg/s})$  i ako je on konstantan kroz sve stepene parne turbine, iznosi

$$N_{ePT}=m_{sp}\cdot l_{ePT}=m_{sp}\cdot\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot l_{iPT}, \text{ kW.} \quad (18)$$

Efektivni izentropski stepen korisnosti parne turbine predstavlja odnos efektivne i izentropske snage, to jest

$$\eta_{ePT}=N_{ePT}/N_{iPT}=\frac{m_{sp}\cdot\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot l_{iPT}}{m_{sp}\cdot l_{iPT}}=\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}. \quad (19)$$

Najčešće parna turbina pokreće električni generator sa kojim čini turboagregat. Da bi se odredila snaga koju generator može dati na svojim priključcima moraju se znati još i gubici u generatoru. Ako je električna snaga generatora  $N_{Gb}$  onda će gubici u generatoru biti jednaki različiti snage dovedene preko spojnice  $N_{ePT}$  i snage koja se može ustanoviti merenjem na priključcima generatora električnim instrumentima  $N_{Gb}$ . Ta razlika  $N_{ePT}-N_{Gb}$  pretvara se u generatoru u toplotu i odvodi se u okolinu rashladnim sredstvom- vazduhom ili vodonikom, koji se obično opet hlade vodom. Toplota iz vode se predaje okolini.

Stepen korisnosti generatora parne turbine se definiše odnosima:

$$\eta_G=l_{Gb}/l_{ePT}=N_{Gb}/N_{ePT}. \quad (20)$$

Specifični rad generatora električne energije iznosi

$$l_{Gb}=\eta_G\cdot l_{ePT}=\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot\eta_G\cdot l_{iPT}, \text{ kJ/kg pare.} \quad (21)$$

Slovo b u indeksu jednačine (20) stoji da bi se time označilo da je to rad, snaga ili stepen korisnosti bruto. Naime jedan deo snage dobijen u generatoru može biti korišćen za pokretanje raznih uređaja to jest za pokrivanje sopstvene potrošnje bilo turbopostrojenja  $N_{sPTP}$ , bilo parnog bloka  $N_{sPB}$ . Neto rad, onda, je manji od bruto. Stepem korisnosti generatora se kreće u granicama  $\eta_G=0,97-0,99$ .

Stepen korisnosti turboagregata je jednak odnosu električnog rada odnosno snage na priključcima generatora i izentropskog rada odnosno snage parne turbine, to jest:

$$\eta_{TA}=\frac{N_{Gb}}{N_{iPT}}=\frac{l_{Gb}}{l_{iPT}}=\frac{\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot\eta_G\cdot l_{iPT}}{l_{iPT}}=\eta_{mPT}\cdot\eta_{iPT}\cdot\eta_G. \quad (23)$$

Stepen korisnosti utilizacionog parnog kotla u ovom slučaju, prema sl. 12, je:

$$\eta_{UPK}=\frac{d_s(i_4-i_{24})}{v_{Gw}\cdot i_{Gw}+Q_{pl}+Q_{hr}}=\frac{9,572(2783,30-593,40)}{10,78\cdot 2116,49+540+2270}=0,8200 \quad (24)$$

gde su:

- $i_{Gw}$ , kJ/m<sup>3</sup> i  $v_{Gw}$ , m<sup>3</sup> /s- entalpija i količina gasovitih produkata procesa topljenja na ulazu u utilizacioni parni kotao,
- $Q_{pl}$ ,  $Q_{hr}$ , kW- toplota poletine i oslobođena toplota usled odvijanja hemijskih reakcija u utilizacionom parnom kotlu (tab. 7 i 8),
- $d_s$ , kg/s- produkcija pare utilizacionog parnog kotla (na izlazu iz kontrolne granice kotla).

Termodinamički stepen korisnosti toplotnog ciklusa bruto ima vrednost:

$$\eta_{TC} = 1 - \frac{q_o}{q_d} = \frac{l_k}{q_d} = 1 - \frac{m_2(i_1 - i_2) + m_{11}(i_1 - i_{11}) + m_4(i_3 - i_4) + m_{17}(i_3 - i_{17}) + m_5(i_5 - i_6)}{m_1(i_1 - i_{24})} =$$

$$= 1 - \frac{0,8482(2783,30 - 2568,40) + 0,1518(2783,30 - 2641,95) + 0,4229(2797,26 - 2465,80) + 0,4253(2797,26 - 2734,98) + 0,4229(2725,50 - 2304,22)}{1,0(2783,30 - 593,40)} = 0,2505$$

gde su

- $q_d$ , kJ/kg sveže pare- dovedena toplota u toplotnom postrojenju,
- $q_o$ , kJ/kg sveže pare- odvedena toplota sa izrađenom parom (na izlazu iz parne turbine),
- $l_k$ , kJ/kg sveže pare- koristan tehnički rad dobijen odvijanjem toplotnog ciklusa.

Za parni blok prikazan na sl. 12, a čiji parametri radnog tela prikazani u tabeli 10, ako se usvoje mehanički stepen parne turbine  $\eta_{mPT}=0,98$ , generatora  $\eta_G=0,98$ , izračunati su sledeći pokazatelji:

- izentropski rad parne turbine (jednačina 15a)  $l_{iPT} = 548,556$  kJ/kg sveže pare,
- efektivni rad parne turbine (jednačina 17)  $l_{ePT} = \eta_{mPT} \cdot l_{uPT} = 0,98 \cdot 466,273 = 456,947$  kJ/kg pare,
- efektivni izentropski stepen korisnosti poarne turbine  $\eta_{ePT} = 456,947 / 548,556 = 0,8330$ ,
- specifični bruto rad generatora (jednačina 21)  $l_{Gb} = 0,98 \cdot 456,947 = 447,808$  kJ/kg,
- stepen korisnosti turboagregata (jednačina 22)  $\eta_{TA} = 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 0,81634$ ,
- unutrašnja snaga parne turbine  $N_{uPT} = d_s [\text{kg/s}] \cdot l_{iPT} \cdot \eta_{iPT} = 9,572 \cdot 548,556 \cdot 0,85 = 4463,161$  kW,
- efektivna snaga parne turbine  $N_{ePT} = d_s \cdot l_{iPT} \cdot \eta_{iPT} \cdot \eta_{mPT} = 9,572 \cdot 548,556 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 4373,898$  kW.

Pri oceni ekonomičnosti jedne parne turbine, potrošnja radnog tela igra najvažniju ulogu, jer od nje uglavnom zavisi potrošnja toplote odnosno goriva, koja ima najjači uticaj na cenu proizvedenog kilovatčasa električne energije. Potrošnja radnog tela pak zavisi od izvršenog rada i specifične potrošnje radnog tela, toplote ili goriva.

Glavni termodinamički parametri parnog bloka i parnog turbopostrojenja kojima se ocenjuje rad predstavljaju:

- specifični električni rad na priključcima generatora bruto ( $l_{Gb}$ ). On se utvrđuje merenjem na kontrolnoj granici turbopostrojenja. Njemu za zadati protok pare  $d_s$ , kg/s odgovara snaga na priključcima generatora

$$N_{Gb} = d_s \cdot \eta_{mPT} \cdot \eta_{iPT} \cdot \eta_G \cdot l_{iPT} = 9,572 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 548,556 = 4286,420 \text{ kW.} \quad (25)$$

Snagu generatora  $N_{Gb}$  čine: snaga iz visokopritisnom delu parne turbine  $N_{Gb1} = 1591,987$  kW, iz dela parne turbine srednjeg pritiska  $N_{Gb2} = 1302,298$  kW i iz niskopritisnog dela parne turbine  $N_{Gb3} = 1392,135$  kW.

- specifična potrošnja radnog tela- sveže pare ( $m_{sp}$ ). To je ona količina radnog tela koju je potrebno dovesti kroz kontrolnu granicu parne turbine, da bi se dobila jedinica rada ili 1 kWh električne energije

$$m_{sp} = \frac{D [\text{kg/h}]}{N_{Gb} [\text{kW}]} = \frac{34,459}{4,286,420} = 8,039 \text{ kg pare/kWh.} \quad (26)$$

Potrebna specifična količina gasovitih produkata iznosi

$$v_{Gw} = \frac{V_{Gw} [m_n^3/h]}{N_{Gb} [kW]} = \frac{38.8100}{4.286,420} = 9.054 \text{ m}_n^3 / \text{kWh}. \quad (27)$$

-specifična potrošnja toplote paroturbinskog postrojenja bruto ( $q_{PTb}$ ) predstavlja količinu toplote koju treba dovesti kroz kontrolnu granicu u turbopostrojenje, da bi se u njemu dobila jedinica rada na izlazu iz kontrolne granice

$$q_{PTb} = \frac{D [kg/h] (m_1 [kg/kg] i_1 [kJ/kg] - m_{24} i_{24} [kJ/kg])}{N_{Gb} [kW]} = \frac{34.459(1,0 \cdot 2783,30 - 1,0 \cdot 593,40)}{4286,420} = 17604,846 \text{ kJ/kWh}. \quad (28)$$

-stepen korisnosti turbinskog postrojenja ( $\eta_{PTb}$ ). To je odnos dobijenog rada na priključcima generatora i dovedene toplote kroz kontrolnu granicu u turbopostrojenje. Rad i toplota moraju se odnositi na istu količinu radnog tela

$$\eta_{PTb} = 3600/q_{PTb} \approx \eta_{iC} \cdot \eta_{mPT} \cdot \eta_{iPT} \cdot \eta_G = 0,2505 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,2045 \quad (29)$$

U jednačini (29) gubici toplotne energije u parovodima i armaturi od utilizacionog parnog kotla do ulaza u parnu turbinu, kao i energija uložene za pogon pumpi, su zanemareni.

-stepen korisnosti parnog bloka ( $\eta_{PBb}$ ). To je odnos dobijenog tehničkog rada na priključcima generatora i dovedene toplote kroz kontrolnu granicu u parni blok (u ovom slučaju toplota gasovitih produkata i poletine)

$$\eta_{PBb} = 3600/q_{PBb} \approx \eta_{UPK} \cdot \eta_{iC} \cdot \eta_{mPT} \cdot \eta_{iPT} \cdot \eta_G = 0,8200 \cdot 0,2505 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,1677. \quad (30)$$

-specifična potrošnja toplote u parnom bloku koji predstavlja odnos dovedene toplote kroz kontrolnu granicu parnog bloka i dobijene snage na priključcima (klemama) generatora.

$$q_{PBb} = \frac{3600(v_{Gw} [m_n^3/s] (i_{Gw} [kJ/m^3] + Q_{pl} [kW_i] + Q_{nr} [kW_i]))}{N_{Gb} [kW]} = \frac{3600(10,780 \cdot 2.116,49 + 540 + 2270)}{4286,420} = 21522,096 \text{ kJ/kWh}. \quad (32)$$

## 5.0. PROIZVODNJA TOPLOTNE I ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za rad Flash Smelting Furnace (FSF) u toku godine 330 dana (vremensko iskorišćenje 90,41%) po 24 h/d sa prosečnim kapacitetom prerade 51,6 t/h suvog koncentrata bakra, proizvodnja električne i toplotne energije iznosi:

• 1. U toku grejne sezone, uslovno uzeto, novembar-april u trajanju od 165 dana i 24 h/d (uzeto je vremensko iskorišćenje FSF 90%) proizvodnja je sledeća:

### 5.1. Proizvodnja električne energije u toku trajanja grejne sezone

S obzirom da je, u toku trajanja grejne sezone, celishodnije je proizvoditi toplotnu energiju za potrebe toplifikacije poslovnog prostora u odnosu na proizvodnju električne energije. Takođe, da bi se izbeglo prigušivanje pare sa pritiska 6,0 MPa na 2,0 MPa, usvaja se da radi samo visokopritisni stepen parne turbine (PT1, sl. 12), jer je toplifikacioni sistem u Temoelektrani u Boru dimenzionisan za te uslove.

$$E_1 = N \cdot \tau \cdot l_{iPT1} \cdot d_s \cdot \eta_{iPT} \cdot \eta_{mPT} \cdot \eta_G = 165 \cdot 24 \cdot 203,735 \cdot 9,572 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 6.304.266,976 \text{ kW}_e\text{h/a,}$$

gde su

- N, dana/a- broj dana rada termoenergetskog sistema (uzeto je N=165 d/a, pola godine je grejna sezona i u toj sezoni zastoji sistema čine 15 dana, godišnje jedan mesec),

-  $\tau$ , h/d- broj radnih sati na dan,

-  $d_s$ , kg/s- produkcija pare u utilizacionom parnom kotlu,

-  $l_{iPT1}$ , kJ/kg-specifični (jedinični) izentropski rad parne turbine u visokopritisnom stepenu (PT1) (poglavlje 4.1.1. i prva dva člana jednačine 15a),

-  $\eta_{iPT}$ - unutrašnji (izentropski) stepen korisnosti parne turbine (jednačina 12),

-  $\eta_{mPT}$ - mehanički stepen korisnosti parne turbine (jednačina 16),

-  $\eta_G$ - stepen korisnosti generatora parne turbine (jednačina 20).

Prosečna dnevna proizvodnja električne energije u periodu trajanja grejne sezone, za 165 dana, iznosi 96.988,723 kW<sub>e</sub>h/d i prosečna angažovana snaga generatora parne turbine 1.591,987 kW<sub>e</sub>.

### 5.2. Proizvodnja toplotne energije u toku trajanja grejne sezone

$$Q_1 = N \cdot \tau \cdot m_2 (i_2 - i_{29}) \cdot d_s \cdot \eta_{RZ} = 165 \cdot 24 \cdot 0,8482 (2568,40 - 504,06) \cdot 9,572 \cdot 0,97 = 64.379.723,34 \text{ kW}_t\text{h/a,}$$

gde su

-  $m_2$ , kg/kg sveže pare-količina pare koja se koristi za potrebe toplifikacije (sl. 12, stanje 2),

-  $i_2$ , kJ/kg- entalpija pare na izlazu iz visokopritisnog stepena parne turbine (tab. 10, stanje 2),

-  $i_{29}$ , kJ/kg- entalpija kondenzata na izlazu iz razmenjivača toplote, uslovno PTP2 (tab. 10, stanje 29),

-  $\eta_{RZ}$ - stepen korisnosti razmenjivača toplote (poglavlje 3.0.).

Prosečna dnevna proizvodnja toplotne energije u periodu trajanja grejne sezone, za 165 dana, iznosi 390.180,142 kW<sub>t</sub>h/d i prosečna angažovana snaga potrošača toplotne energije 16.257,506 kW<sub>t</sub>.



• 2. Van grejne sezone, uslovno uzeto, maj- oktobar u trajanju od 165 dana i 24 h/d (uzeto je vremensko iskorišćenje FSF 90%) proizvodnja je sledeća:

### 5.3. Proizvodnja električne energije van trajanja grejne sezone

S obzirom da je, van grejne sezone, proizvodnja toplotne energije je isključivo za potrebe tehnologije i pripreme tople potrošne vode, toplotni ciklus se odvija u celosti prema sl. 12 (poglavlje 3.0.).

$$E_2 = N \cdot \tau \cdot l_{IPT} \cdot d_s \cdot \eta_{IPT} \cdot \eta_{mPT} \cdot \eta_G = 165 \cdot 24 \cdot 548,556 \cdot 9,572 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 16.974.223,75 \text{ kW}_e\text{h/a,}$$

gde je

-  $l_{IPT}$ , kJ/kg- specifični (jedinični) izentropski rad svih stepena parne turbine (jednačina 15a),

Prosečna dnevna proizvodnja električne energije u periodu van grejne sezone, za 165 dana, iznosi 102.874,083 kW<sub>e</sub>h/d i prosečna angažovana snaga generatora parne turbine 4.286,420 kW<sub>e</sub>.

### 5.4. Proizvodnja toplotne energije van trajanja grejne sezone

$$Q_2 = N \cdot \tau \cdot N_{PTP2} \cdot d_s \cdot \eta_{RZ} = 165 \cdot 24 \cdot 8000 \cdot 9,572 \cdot 0,97 = 30.729.600,00 \text{ kW}_t\text{h/a,}$$

gde je

-  $N_{PTP2}$ , kW<sub>t</sub>-angažovana snaga potrošača tehnološke pare PTP2 (sl. 12)

Prosečna dnevna proizvodnja toplotne energije u periodu van grejne sezone, za 165 dana, iznosi 186.240,00 kW<sub>t</sub>h/d i prosečna angažovana snaga potrošača toplotne energije 7.760,00 kW<sub>t</sub>.

### 5.5. Ukupna godišnja proizvodnja električne i toplotne energije

Za rad topionice u toku godine sa vremenskim iskorišćenjem od 90,41%, korišćenjem sekundarne (otpadne ) energije iz procesa, produkovaće se električna i toplotna energija i to:

1. Električna energija:  $E = E_1 + E_2 = 23.278.490,73 \text{ kW}_e\text{h/a}$ , prosečno (za 330 dana i 24 h/d) 70.540,881 kW<sub>e</sub>h/d i prosečna angažovana snaga parne turbine  $N_{Gb} = 2.939,203 \text{ kW}_e$ .

2. Toplotna energija:  $Q = Q_1 + Q_2 = 95.109.323,34 \text{ kW}_t\text{h/a}$ , prosečno (za 330 dana i 24 h/d) 288.210,071 kW<sub>t</sub>h/d i prosečna angažovana toplotna snaga potrošača toplote  $Q_{od} = 12.008,753 \text{ kW}_t$ .

Za predviđena cena električne energije [15, Appendix 7,0- OPEX] 0,05 USD/kWh (za kurs 84 RSD/USD, cena električne energije je 4,20 RSD/kW<sub>e</sub>h<sup>26</sup>), cena proizvedene električne energije (E) iznosi 1.163.924,54 USD/a (97.769.661,36 RSD/a) i cena toplotne energije (Q), ako je cena pare za sušenje koncentrata pritiska 20 bar 29,5 USD/t, za raspoloživu toplotu pare ako njena entalpija na ulazu sušare je 2641,95 kJ/kg ili 0,734 MW<sub>t</sub>h/t pare (tab. 10, stanje 11) potrošnja pare, za isporučenu toplotu za 95.109.323,34 kW<sub>t</sub>h/a, iznosi 129.560 t<sub>pare</sub>/a. Cena toplote, tada, je

---

<sup>26</sup> Cena električne energije, svedena na aktivnu energiju, za potrošnju RTB-Bor na nivou TS Bor-3, u maju 2010. godine je ostvarena na nivou 3,9928 RSD/kW<sub>e</sub>h ili 0,0462 USD/kW<sub>e</sub>h.

3.822.020,00 USD/a ili 40,19 USD/MW<sub>t</sub>h (za kurs 84 din/USD, prevedene cene u RSD iznose: para 2478,00 RSD/t ili toplote 3.375,96 RSD/MW<sub>t</sub>h<sup>27</sup>).

Povećanje energetske efikasnosti može se postići ekspanzijom pare u turbini do pritiska, na primer 0,008 MPa. Za tu svrhu potrebno je da se ugradi još jedan regenerativni razmenjivač toplote za zagrevanje pare sa stanja 6, sl. 12 do krive zasićenja i jedan stepen turbine u kojem će ekspanzirati para sa pritiska 0,02 MPa na 0,008 MPa ili da se u regenerativnom zagrevaču pare RZ1 (sl. 12) para pregreje.

Za toplotni ciklus, koji se odvija u paroturbinskom postrojenju prikazanom na sl. 12, stepen korisnosti parnog bloka sa kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije (kogeneracioni sistem), na osnovu tabele 8 i poglavlja 5.5., iznosi [18]:

$$\eta^{I}{}_{PBbKP} = \frac{N_{Gb} + Q_{od}}{Q_{Gw} + Q_{hemijiskih.reakcija} + Q_{poletine}} = \frac{3949,823 + 12008,753}{22817,879 + 2266,67 + 544,09} = 0,6227 \left[ \frac{kW_{e+t}}{kW_{e+t}} \right].$$

Specifična potrošnja toplotne energije paroturbinskog postrojenja bruto kombinovane proizvodnje, svedena na proizvodnju električne i toplotne energije, prema poglavlju 4.0. i tabeli 10, iznosi [18]:

$$q^{I}{}_{PTbKP} = \frac{Q_{dovedena.paroturbinskom.postrojenju}}{N_{Gb} + Q_{odvedene}} = \frac{D(i_1 - i_{24})}{N_{Gb} + Q_{od}} = \frac{34459(2783,30 - 593,40)}{2939,203 + 12008,753} = 5048,30 \frac{kJ}{kW_e h + kW_t h}.$$

---

<sup>27</sup> Cena toplote (pare) u TIR-u, za potrošače van TIR-a u 2010. godini, je projektovana na iznos: 3.466,80 RSD/MW<sub>t</sub>h što je oko 2.579,30 RSD/t pare (ili 41,271 USD/MW<sub>t</sub>h, to jest 30,71 USD/t pare)

## 6. CENA PROIZVODA TERMOENERGETSKOG SISTEMA TOPIONICE NAKON MODERNIZACIJE U BORU

Analiza efikasnosti termoenergetskog sistema Topionice bakra nakon uvođenja Flash Smelting tehnologiju u Boru, posmatran kroz nivo cena proizvoda (električne i toplotne energije i tehnološke pare) zasniva se na svođenju heterogenih proizvoda (vodene pare toplotne i električne energije) na uporedive veličine. Kazualnost troškova i nosilaca troškova (proizvoda) najveći je problem koji se postavlja pri utvrđivanju cena u industriji koju karakteriše kombinovana-kogeneracijska (spregnuta) proizvodnja električne i toplotne energije. U industrijskim energanama, u kojima se kao proizvodi pojavljuju električna energija i vodena para za tehnološke i druge potrebe, u postupku određivanja cene, poseban problem predstavlja raspodela troškova, na primer, paroturbinskog agregata u koji ulazi (sveža) vodena para visokog pritiska, a izlaze električna energija i para srednjeg (2,0 MPa) i niskog pritiska (0,70 MPa). Za utvrđivanje modela za raspoređivanje troškova na nosioce troškova potrebno je i električnu energiju i vodenu paru visokog, srednjeg i niskog pritiska svesti na uporedive veličine. Neprihvatljivo je troškove deliti prema količini pare (u tonama) i električne energije (u kWh). Posredstvom eksergetske analize postiže se uvid u kvalitet transformacije toplotne energije gasovitih produkata i poletine u električnu i toplotnu energiju i tehnološku paru. Veličine koje se upoređuju su iste vrste, imaju istu fizičku prirodu- mehanički rad, za razliku od toplotnog bilansa gde se mehanički rad i toplota posmatraju kao jednako vredni.

S obzirom na usvojene termoenergetske šeme topionice bakra, nakon modernizacije, (sl. 12) proizvodi korišćenja sekundarne (otpadne) energije procesa topljenja su: električna energija, tehnološka para pritiska 2,00 MPa i tehnološka para pritiska 0,70 MPa. Cena proizvoda može se izraziti:

- po proizvedenoj pari u utilizacionom parnom kotlu pritiska 6,0 MPa i
- po električnoj energiji i tehnološkoj pari.

Po drugoj varijanti, vrednost troškova mora se raspodeliti po proizvodima, jer se paralelno proizvode električna energija i tehnološka para srednjeg i niskog pritiska. Raspodela, najpovoljnije je, da se vrši na osnovu eksergije proizvoda<sup>28</sup>. Po toj osnovi koeficijent raspodele troškova je u saglasnosti sa raspodelom eksergije po proizvodima, to jest:

$$b_i = \frac{e_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{i=3} (e_i \cdot m_i)} = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^{i=3} E_i} \quad (33)$$

gde su

$e_i$ , kWh/kWh, kJ/kg- eksergija i-tog proizvoda,  
 $m_i$ , kWh/h, kg/h- količina i-tog proizvoda.

Eksergija proizvedene električne energije je jednaka nominalnoj proizvedenoj električnoj energiji, eksergija tehnološke pare (tabela 10, sl. 12) pritiska 2,0 MPa (stanja 11) je  $e_{11}=880,897$  kJ/kg i eksergija tehnološke pare pritiska 0,70 MPa, (stanja 17) iznosi  $e_{17}= 778,103$  kJ/kg. Eksergija<sup>29</sup> proizvoda kao  $E_i = e_i \cdot m_i$ , za 330 dana u godini rada postrojenja, iznosi:

1. Električna energija: $E_1 =$	23.278.490,73 kWh/a,
2. Para poz. 11, tab. 10: $E_2 = (34.459 \text{ kg/h} \cdot 0,1518 \text{ kg/kg} \cdot 880,897 \text{ kJ/kg} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}) / 3600 \text{ s/h} =$	10.551.338,81 kWh/a,
3. Para poz. 17, tab. 10: $E_3 = (34.459 \text{ kg/h} \cdot 0,4253 \text{ kg/kg} \cdot 778,103 \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}) / 3600 \text{ s/h} =$	25.087.525,29 kWh/a,

$$\sum_{i=1}^{i=3} E_i \quad 58.917.354,83 \text{ kWh/a}$$

Količina proizvoda:

Električna energija 23.278.490,73 kWh/a,

<sup>28</sup> Mitovski, M. KGH, broj 2/1998., str. 69-73;

<sup>29</sup> Eksergija električne energije jednaka je njenoj energiji

Para stanja 11  $m_{11}= 272.915,28 \text{ t/a} \cdot 0,1518 \text{ kg/kg} = 41.428,54 \text{ t/a}$ ,  
 Para stanja 17  $m_2=272.915,28 \text{ t/a} \cdot 0,4253 \text{ kg/kg} = 116.070,87 \text{ t/a}$ .

Toplotna snaga pare (prema tab. 10)

:

Para stanja 11  $(i_{11}-i_{24})/3600 = (2641,95-593,40)\text{MJ/t} / 3600 \text{ s/h} = 0,569 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{pare}}$ ,  
 Para stanja 17  $(i_{17}-i_{24})/3600 = (2734,98-593,40)/3600 \text{ s/h} = 0,595 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{pare}}$ .

Koeficijenti raspodele troškova iznose:

- za električnu energiju  $b_1=23.278.490,73/58.917.354,83 = 0,3951$ ,
- za tehnološku paru pritiska 2,0 MPa  $b_2=10.551.338,81/58.917.354,83 = 0,1791$ ,
- za tehnološku paru pritiska 0,70 MPa  $b_3=25.087.525,29/58.917.354,83 = 0,4258$ .

1. Za izgradnju novog utilizacionog parnog kotla, parne turbine, rashladne kule sa pratećom opremom predviđaju se sledeća investiciona ulaganja<sup>30</sup>:

1. Inženjering usluga, izrada, isporuka opreme za UPK i nadzor <sup>31</sup>	12.086.590 USD
2. Parna turbina, pumpi, cevovodi, rashladna kula	5.000.000 USD
3. Toplotna podstanica	1.000.000 USD
4. Hala i građevinski radovi (210 US\$ <sup>32</sup> /m <sup>2</sup> )	500.000 USD
5. Montaža (15% od vrednosti opreme)	2.637.988 USD
6. Obuka kadrova, probni pogon, dokazivanje garancuija, osiguranje	40.000 USD
<b>UKUPNO:</b>	<b>21.264.578 USD.</b>

2. **Troškovi rada termoenergetskog sistema topionice.** Termoenergetski sistem radi sa godišnjim vremenskim iskorišćenjem od 90%, zbog remonta i drugih zastoja. Troškovi proizvodnje, radi lakšeg praćenja, biće svedeni na godinu dana rada sistema. Ukupne troškove proizvodnje električne energije i tehnološke pare čine: troškovi radne snage, amortizacija, troškovi za demineralizovane vode i hemikalije, trošak za utrošenu električnu energiju, troškovi održavanja opreme, troškovi osiguranja i zajednički troškovi Preduzeća.

2.1. **Radna snaga.** Termoenergetski sistem, u principu, radi 24h na dan, a posada u četvorobrigadnom smenskom radu i jedna smena za zamenu. Posadu čine: rukovodilac (1 radnik), rukovaoc parnog kotla (5), rukovalac parne turbine (5), pomoćno osoblje (5), Mesečna bruto primanja, u proseku po radniku, iznosi 900 USD. Tada trošak za radnu snagu rada sistema iznosi:

$$T_{r1}=16 \text{ radnika} \cdot 900 \text{ US\$/mesec} \cdot 12 \text{ mes/a} = 172.800 \text{ USD};$$

2.2. **Amortizacija.** Period amortizacije se usvaja za opremu da je 25 godina (godišnja stopa amortizacije je 4,0% knjigovodstvene vrednosti termoenergetskog sistema), a za građevinske radove 40 godina (godišnja stopa amortizacije je 2,5%).. Trošak od amortizacije, za sat rada sistema, iznosi;

$$T_{r2}=20.724.578 \cdot 0,040 + 500.000 \cdot 0,025 = 841.483,12 \text{ USD/h};$$

2.3. **Potrošnja demineralizovane vode.** Gubici pare, kao kondenzat, koji se ne vraća u ciklus, iz tehnoloških i bezbedonosnih razloga, je 0,9 t/h. Cena demineralizovane vode je 141,25 din/m<sup>3</sup> (1,91 US\$/m<sup>3</sup>). Trošak za utrošenu demineralizovanu vodu, svedena na sat rada sistema, je:

<sup>30</sup> Na osnovu [1] kurs valuta je 1€=1,0896 USD (\$) i 1USD=107,6789 RSD (dinar R. Srbije)

<sup>31</sup> Iz dokumenta [1] 653/000-000-M5-001-R1 (338158-P5376 Outotec, pogl. 2.2.Price for Smelter Area) cena WHB je 9.517.000 €.

<sup>32</sup> Jovović, A, Karan, M.,Procesna tehnika br. 3-4/1997, str. 253-259

$$T_{r3}=0,9 \text{ t/h} \cdot 1,91 \text{ US\$/t} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} = 1.375 \text{ USD/a};$$

**2.4. Potrošnja hemikalija.** Za popravljavanje kvaliteta napojne i kotlovske vode i za iskuvavanje utilizacionog parnog kotla predviđa se dnevna potrošnja hemikalija: hidrazina ((24%)  $\text{N}_2\text{H}_4$ , čija je cena 74,50 din/dm<sup>3</sup>) 2 g/m<sup>3</sup> napojne (kotlovske) vode, trinatrijumfosfata ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , cena 40,00 din/kg) 8 g/m<sup>3</sup> vode i natrijumhidroksida (NaOH, cena 8,5 din/kg). 10 g/m<sup>3</sup> napojne ili kotlovske vode. Trošak za hemikalije za doziranje, sveden na sat rada sistema, iznosi:

$$T_{r4}=[34,459 \text{ t/h}(0,002 \text{ g/m}^3 \cdot 74,50 \text{ din/kg} + 0,008 \text{ kg/m}^3 \cdot 40 \text{ din/kg}) + 0,010 \text{ kg/dan} \cdot 8,5 \text{ din/kg}] / 24 \text{ h} \cdot \text{d/a} = 7056,72 \text{ din/a} = 530,64 \text{ USD/a};$$

**2.5. Potrošnja električne energije.** Za pogon pumpi, čekića i transport poletine potrošnja električne energije, čija se snaga procenjuje na 200 kW, iznosi:

$$T_{r5}=200 \text{ kW} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 0,05 \text{ USD/kWh} = 79.200 \text{ USD/a};$$

**2.6. Troškovi održavanja.** Vrednost troškova za održavanje opreme termoeenergetskog sistema topionice se usvaja da je 10% od troškova amortizacije, pa je:

$$T_{r6}=0,10 \cdot 841.483,12 = 84.148,31 \text{ US\$/a};$$

**2.7. Osiguranje od požara.** Oprema u TIR-u, zadnjih nekoliko godina, se osigurava samo od pojave požara i to po stopi od 1,0 ‰ (jedan promil) od knjigovodstvene vrednosti opreme. Tada je trošak osiguranja od požara, sveden na sat rada:

$$T_{r7}=0,001 \cdot 21.264.578 = 21.266 \text{ USD/a};$$

**2.8. Ostali troškovi preduzeća.** Ostali troškovi preduzeća od zajedničkog interesa se usvajaju 10% od bruto zarade radnika, to jest:

$$T_{r8}=0,10 \cdot 172.800 = 17.280 \text{ USD/a}.$$

Ukupni troškovi proizvodnje termoeenergetskog sistema topionice, za rad od jedne godine, iznose:

$$T_r^{1-8} = T_{r1} + T_{r2} + T_{r3} + T_{r4} + T_{r5} + T_{r6} + T_{r7} + T_{r8} = 172.800 + 801.483 + 1.375 + 530,64 + 79.200 + 80.148 + 20.225 + 17.280 = 1.173.041,64 \text{ USD/a}.$$

S obzirom da gasoviti produkti iz Flash Smelting peći izlaze sa visokim sadržajem energije (fizičke i hemijske energije), a u nemogućnosti određivanja njihove cene koštanja, napraviće se procena na osnovu cene koštanja “ekvivalentnog” uglja. Uzima se ugalj “Soko” po ceni 7800 RSD/t=105,40 USD/t, čija je donja toplotna moć  $H_{dw}=17 \text{ MJ/kg}$ . Količina uglja određiće se na osnovu raspoloživog toplotnog fluksa gasova od  $\Delta Q_{Gw}=17.131,49 \text{ kW}_2$  (tab. 7) i efikasnost utilizacionog parnog kotla  $\eta_k=0,80$ , to jest:

$$T_{r9} = \frac{17131,49 \text{ kW} \cdot 0,1054 \text{ \$/kg}_{uglja} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 3600 \text{ s/h}}{17000 \text{ kJ/kg}_{uglja} \cdot 0,80} = 3.786.507,65 \text{ USD/a}.$$

**Pregled troškova za godinu dana rada termoeenergetskog sistema topionice**

**TABELA 11**

	VREDNOST	CENA PROIZVODA $c_{pi}$	UČEŠĆE
--	----------	-------------------------	--------

TROŠAK	TROŠKA, $T_{ri}$ USD/a	električna energija USD/kW <sub>e</sub> h	para stanja 11, sl. 12 USD/MW <sub>t</sub> h	para stanja 17, sl. 12 USD/MW <sub>t</sub> h	TROŠKA %
1. Radna snaga	172.800,00	0,00293	1,31289	1,06539	3,45
2. Amortizacija	841.483,12	0,01428	6,39336	5,18813	16,81
3. Demineralizovana voda	1.375,00	0,00002	0,01045	0,00848	0,03
4. Hemikalije	530,64	0,00001	0,00403	0,00327	0,01
5. Električna energija	79.200,00	0,00135	0,60174	0,48830	1,58
6. Održavanje	84.148,31	0,00143	0,63934	0,51881	1,68
7. Osiguranje	21.266,00	0,00036	0,16157	0,13111	0,43
8. Zajednički troškovi preduzeća	17.280,00	0,00029	0,13129	0,10654	0,35
<b>UKUPNO (1÷8):</b>	<b>1.218.083,07</b>	<b>0,02067</b>	<b>9,25467</b>	<b>7,51003</b>	<b>24,34</b>
9. Gasoviti produkti u WHB	3.786.507,65	0,06427	28,76885	23,34556	75,66
<b>UKUPNO (1÷9):</b>	<b>5.004.590,72</b>	<b>0,08494</b>	<b>38,02352</b>	<b>30,85559</b>	<b>100,00</b>

Učešće troškova u proizvodnji električne energije (23.278.490,73 kWh/a), tehnološke pare pritiska 2,0 MPa (41.428,54 t/a, 23.572,839 MW<sub>t</sub>h/a) i tehnološke pare pritiska 0,70 MPa (116.070,87 t/a, 69.062,168 MW<sub>t</sub>h/a) koje se proizvode u termoenergetskom sistemu topionice nakon modernizacije, je prikazano u tab. 6, a izračunate prema jednačinama 33 i  $c_i = \sum c_{pi} \cdot b_i \cdot \sum T_{ri} / m_i$ .

Na kraju, proizvodna cena produkata termoenergetskog sistema topionice, nakon modernizacije, kod produkcije 34,459 t/h suvozasicene pare pritiska 6,0 MPa, prema jednačini  $c_{pi} = (b_i \cdot T_{ri}) / m_i$ , po kursu 74 RSD/USD, iznosi:

- za električnu energiju 0,085 USD/kWh = 6,290 din/kWh,
- za tehnološku paru pritiska 2,0 MPa 38,023 USD/MW<sub>t</sub>h = 2813,702 din/MW<sub>t</sub>h = 1600,996 RSD/t,
- za tehnološku paru pritiska 0,7 MPa 30,856 USD/MW<sub>t</sub>h = 2283,344 din/MW<sub>t</sub>h = 1358,590 RSD/t.

Proizvodna cena suvozasicene pare pritiska 6,0 MPa na izlazu iz ulaznog parnog kotla, stanje 1, sl. 12, za usvojeni hipotetički termoenergetski sistem topionice (parni blok) iznosi:

- $C_{pare, 6,0 MPa} = 5.004.590,72 \text{ USD} / (34,459 \text{ t/h} \cdot 330 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}) = 18,337 \text{ USD/t} = 1.356,938 \text{ RSD/t}$ .

## 7.0 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Projekat stoleća, koji je realizovan za tri godine (na dan rođenja Aleksandra Vučića, 5. marta 2015. godine), u metalurgiji RTB-Bor izgrađena je Flash Smelting peć (FSF) za topljenje bakronosne šarže kapaciteta topljenja 51,6 t/h suvog koncentrata ili 60,6 t/h šarže, odnosno pri vremenskom iskorišćenju od 90% godišnje, prerada 400.000 t koncentrata i godišnje proizvodnje od 80.000 t anodnog bakra. Iz Flash Smelter Furnace oslobađa se sekundarna otpadna energija, za temperaturnu razliku 1270°C i 350°C, u količini: sa gasovima, čija je količina 38.810 m<sup>3</sup>/h, 19,11 MW<sub>t</sub>, sa poletinom 0,54 MW<sub>t</sub> i iz hemijskih reakcija u gasnom traktu ulaznog parnog kotla 2,27 MW<sub>t</sub>. Iz ove toplote se proizvodi u ulaznom parnom kotlu UPK (na engleskom WHB) suvozasicena para pritiska 6 MPa u količini od 34,459 t/h (LAVALIN je izračunao da je ta količina 27,5 t/h, projektna 31 t/h, što je niže nego računice autora, poglavlja 3.0. i 3.1.). Korišćenje proizvedene pare u ulaznom parnom kotlu FSF, Ugovorom sa SNC LAVALIN-om, iz ne zna se kojih razloga, ova tehnički i tehnološki složena problematika, nije obuhvaćena. Pogotovu što parametri postojećeg termoenergetskog sistema Termoelektrane RTB-Bor u mnogome se razlikuju od parametara termoenergetskog sistema predviđene Flash Smelting Furnace.

Proizvedena para se koristi za potrebe procesa proizvodnje bakra, za toplifikaciju poslovnog prostora i za proizvodnju električne energije. Potreba za toplotom u van grejnoj sezoni je procenjena na 8 MW<sub>t</sub>, a u grejnoj sezoni 24 MW<sub>t</sub>. Pošto je veća proizvodnja toplote od potrebe u van grejnoj sezoni, od „viška“ pare proizvođače se električna energija. Za proizvodnju električne

energije bila su moguća tri slučaja, mada ovde ih pominjem kao nostalgija, postavljeno je u primeni prvo rešenje, ali dužnost mi je kao termoenergetičara da ih ovde pomenem, na žalost građana:

1. Korišćenje paroturbinskog postrojenja u Topionici koje će proizvoditi toplotu za potrebe baznog dela RTB-Bor Grupe i električnu energiju u trostepenoj kondenzacionoj parnoj turbini u kojoj će ekspandirati suvozasiceana para. U ovom slučaju, u sklopu Topionice, treba ugraditi toplotne razmenjivačke stanice sa potrebnim pumpama za transport vrele vode i priključivanje na postojeći vrelvodni sistem, tabela 12.

**Pregled proizvodnje električne i toplotne energije i angažovane snage Tab. 12.**

Parametar	Mera	Numerička vrednost
Rad	dan/a	330
Rad	h/dan	24
Produkcija pare	t/h	34,459 (9,572 kg/s)
Produkcija pare	t/a	272.915,280
<b>Grejna sezona (novembar-april)</b>		
Proizvodnja električne energije	kW <sub>e</sub> h	6.304.266,976
Proizvodnja toplotne energije	kW <sub>t</sub> h	64.379.723,340
Angažovana snaga na klemama generatora, N <sub>Gb</sub>	kW <sub>e</sub>	1.591,987
Angažovana toplotna snaga	kW <sub>t</sub>	16.257,506
<b>Van grejne sezone (maj-oktobar)</b>		
Proizvodnja električne energije	kW <sub>e</sub> h	16.974.223,750
Proizvodnja toplotne energije	kW <sub>t</sub> h	30.729.600,000
Angažovana snaga na klemama generatora, N <sub>Gb</sub>	kW <sub>e</sub>	4.286,420
Angažovana toplotna snaga	kW <sub>t</sub>	7.760,000
<b>U toku godine (januar-decembar, 330 dana)</b>		
Proizvodnja električne energije	kW <sub>e</sub> h/a	22.278.490,730
Proizvodnja toplotne energije	kW <sub>t</sub> h/a	95.109.323,340
Angažovana snaga na klemama generatora, N <sub>Gb</sub>	kW <sub>e</sub>	2.939,203
Angažovana toplotna snaga	kW <sub>t</sub>	12.008,753
<b>Jedinična cena proizvedene električne i toplotne energije</b>		
Cena električne energije	USD/kW <sub>e</sub> h	0,0850
Cena toplote (para 2,0 MPa)	USD/MW <sub>t</sub> h	38,023
Cena toplote (para 0,7 MPa)	USD/MW <sub>t</sub> h	30,856
<b>Investiciona ulaganja i troškovi proizvodnje</b>		
Investiciona ulaganja	USD	21.264.578,00
Troškovi proizvodnje	USD/a	5.004.590,72

2. Korišćenje protivpritisne parne turbine u Topionici, postojeće parne turbine (BBC) i postojeći vrelvodni sistem u Termoelektrani RTB-Bor. Za ovu svrhu suvozasiceana para pritiska 6 MPa proizvedena u utilizacionom parnom kotlu se pregrevava na temperaturi od 440°C. Iz protivpritisne parne turbine izrađena para pritiska 2 MPa i temperature 300°C delom se koristi za toplifikacione svrhe, a iz preostalog dela se proizvodi električna energija u kondenzacionim parnim turbinama BBC u Termoelektrani RTB-Bor.

3. Korišćenje kondenzacione parne turbine u Topionici i postojeći vrelovodni sistem u Termoelektrani RTB-Bor. Za ovu svrhu proizvedena suvozasiceana para u utilizacionom parnom kotlu se pregreva na temperaturi od 450°C. Za toplifikacione potrebe iz visokopritisnog stepena parne turbine se oduzima para parametara: pritiska 2 MPa i temperature 300°C. Ona se transportuje postojećim parovodima (ukoliko njihovo stanje zadovoljava) do Termoelektrane RTB-Bor za potrebe toplifikacije baznog dela RTB-Bor Grupe.

U slučaju korišćenja parnih turbina BBC u Termoelektrani RTB-Bor i vrelovodnog sistema (tačka 2 ovog poglavlja) potrebno je izvršiti generalni remont parnih turbina i ispitati stanje i preostali vek starog i novog parovoda i kondenzatovoda na liniji Topionica-Termoelektrana i da se eventualno ugradi novi parovod do pogona regeneracije elektrolita u Elektrolizi.

Svakako u periodu van grejne sezone (maj-oktobar) osim neophodne toplotne energije proizvodiće se električna energija, a u grejnoj sezoni proizvodnja električne energije biće daleko manja nego van grejne sezone.

Aktuelno rešenje koje je usvojio SNC [40] LAVALIN i rukovotstvo RTB Bor, na žalost privrede i grada Bora, podrazumeva ugradnju nove opreme u topionici za proizvodnju pare i njenog korišćenja, a zadržava samo vrelovođe i toplotnih podstanica osim one stacioniranih u Termoelektrani RTB-Bor. Ovo rešenje ne zadovoljava u potpunosti toplifikacije baznog dela RTB-Bor jer je niža angažovana toplotna snaga od potrebne. Troškovi eksploatacije su niža, jer ne predviđa pregrevanje pare, mada jedinične proizvođačke cene proizvoda ne razlikuju se bitno od cene proizvoda po drugim rešenjima. Oprema koja će biti ugrađena je savremena sa znatno bolje efikasnosti i pouzdanosti. Takođe, ovo rešenje traži veću pažnju u rukovanju i regulaciji parametara proizvedene i korišćene pare. Termoenergetska šema predloženog rešenja, ostvaruje prosečnu godišnju angažovanu snagu parne turbine 2.939,203 kW<sub>e</sub> i toplotnu snagu sistema za proizvodnju toplotne energije 12.008,753 kW<sub>t</sub>. Proizvodna cena električne energije je 0,0850 USD/kW<sub>e</sub>h i cena toplote (pare pritiska 2,0 MPa) 38,023 USD/MW<sub>t</sub>h i (pare 0,7 MPa) 30,856 USD/MW<sub>t</sub>h ili cena toplote pare u proseku 32,683 USD/MW<sub>t</sub>h ili 19,235 USD/t pare. U tabeli 12. prikazan je uporedni pregled sve tri razmatrane varijante proizvodnje električne i toplotne energije. Rešenje 1 podrazumeva proizvodnju električne i toplotne energije iz suvozasiceane pare pritiska 6,0 MPa u Topionici bakra. Rešenje 2 podrazumeva proizvodnju električne energije u protivpritisnoj parnoj turbini u Topionici i u kondenzacionim parnim turbinama BBC u Termoelektrani RTB-Bor i transformaciju toplotne energije pare u toplifikacionom sistemu Termoelektrane RTB-Bor. Rešenje 3 podrazumeva proizvodnju električne energije u kondenzacionom parnom turbinom u Topionici i transformaciju toplote pare u toplifikacionom sistemu Termoelektrane RTB-Bor. Rešenja 2 i 3 nisu predmet ove studije, jer je usvojeno rešenje 1.



## 8.0. POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE

### 8.1. POSTOJEĆI POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE, STANJE 2015. GODINE

**Topionica.** U topionici para se koristi za tehnološke potrebe za zagrevanje vazduha za sagorevanje goriva, za zagrevanje i održavanje potrebne temperature mazuta, za zagrevanje i sušenje uglja ( za zagrevanje primarnog vazduha), za tehnološka zagrevanja i zagrevanje prostorija u Fabrici kiseonika.

Zadnjih desetak godina u pogonima topionice para se koristi za zagrevanje službenih prostorija (kabine, kancelarije i drugo). Na ovaj se način gubi velika količina energije i kondenzata. Za buduće, povoljnije je rešenje da se sve službene prostorije priključe (povežu) na industrijski vrelovod "E", koji prolazi u neposrednoj blizini (pored pogona plamene rafinacije).

Tehnološka para, u pravom smislu te reči, u topionici se priprema u tri stanice:

- 1. U stanici kod ulaznog parnog kotla broj 1 za potrebe zagrevanja primarnog vazduha, predgrevanje sekundarnog vazduha i za potrebe fluosila na reaktoru broj 1. Kapacitet ove stanice je 5,15 t/h. Para pritiska 4,4 MPa prigušuje<sup>33</sup> se na 1,1-1,4 MPa.

- 2. U aneksu ulaznih parnih kotlova broj 3 i 4 egzistiraju dve "reducir" stanice<sup>34</sup>. Jedna je kapaciteta 11 t/h gde se para prigušuje sa 4,2 MPa na 1,6 MPa. Ova para se koristi za predgrevanje vazduha za sagorevanje mazuta (projektovana potrošnja pare 2x2,13 t/h ) i za potrebe fluosila reaktora broj 2.

Druga stanica, kapaciteta 8,0 t/h, obezbeđuje paru pritiska 1,2 MPa i temperature 200°C. Ova para se koristi za zagrevanje i održavanje temperature mazuta u rezervoarima i mazutovodu do plamene peći broj 2 i anodnih peći i za potrebu Fabrike kiseonika leti projektovana potrošnja je 0,5 t/h, a zimi 1,0 t/h, jer se koristi za toplifikaciju prostorija.

Potrošnja pare koja se koristi za zagrevanje napojne vode u spremnicima sa 110 na 180°C ovde se posebno ne prikazuje- to je potrošnja u bruto iznosu.

Veći deo proizvedene pare u ulaznim parnim kotlovima u topionici transportuje se u termoelektranu gde se koristi za proizvodnju toplotne i električne energije. U periodu 1974. do 1997. godine isporučena para čini 63,33 do 88,66% proizvedene pare u topionici ili 97.121-275.980 t/a.

**Pogon za regeneraciju elektrolita.** Pogon za regeneraciju elektrolita tehnološkom parom se snabdeva iz magistralnog parovoda topionica-termoelektrana gde se, termodinamički nepovoljno, pare se prigušuje sa 4,0 MPa na potreban pritisak i pothlađuje na 165°C. Projektovana potrošnja i kvalitet tehnološke pare je sledeća<sup>35</sup>:

- 1. Za uparavanje 4.360 t/a pare pritiska 0,7 MPa(a) i temperature 165°C,
- 2. Za rekristalizaciju 280 t/a pare pritiska 0,2 MPa(a) i temperature 165°C,
- 3. Za sušenje 1.320 t/a pare pritiska 0,2 MPa(a) i temperature 165°C.

Kondenzat se ne vraća jer je dosta kiseo, pa se može koristiti samo za dopunu tehnološke vode u pogonu elektrolitičke rafinacije. U sistemu cirkuliše rashladna voda 3.878 do 3.998 m<sup>3</sup>/dan.

**Zlatara.** Potrošnja tople vode u pogonu "Zlatara", po projektu<sup>36</sup>, iznosi 40.000m<sup>3</sup>/god ili max. 60 m<sup>3</sup>/h, temperatura vode: na ulazu je 130°C, a na izlazu 100°C, pritisak tople vode na ulazu 0,4 MPa(n) i na izlazu 0,2 MPa(n). Potrošnja rashladne vode max 30 m<sup>3</sup>/h (28.800 m<sup>3</sup>/a). Potrošnja lož ulja 480 t/a max 250 kg/h), vazduha pritiska 0,4 MPa(n) max.800 m<sup>3</sup> /h (440.000 m<sup>3</sup> /h ) i

<sup>33</sup> Crtež broj D202344 vlasništvo Babcock Oberhausen, Nemačka

<sup>34</sup> Crtež broj R207572 vlasništvo Babcock Oberhausen, Nemačka

<sup>35</sup> Glavni tehnološki projekat regeneracije elektrolita broj 4950, Institut za bakar Bor, 1979.

<sup>36</sup> "Postrojenje za preradu anodnog mulja u Boru, knjiga 1, Institut za bakar, Bor,

potrošnja električne energije (5,25 kV, 50 Hz i 3 faze) 2,2 GWh/a (specifična potrošnja električne energije je 21,4 kWh/kg (Au+Ag+Se)). Instalirana toplotna snaga u zlatari iznosi 4,060 MW<sub>t</sub>.

**Elektrolitička rafinacija bakra.** U pogonu elektrolitičke rafinacije bakra ima instalirano toplotne podstanice toplotne snage 31,370 MW<sub>t</sub>. Iz njih se snabdevaju sledeći potrošači toplotne energije<sup>37</sup>:

- 1. Ventilaciono grejanje proizvodnih hala 12,66 MW<sub>t</sub>,
- 2. Zagrevanje tehnološke vode 1,55 MW<sub>t</sub>,
- 3. Priprema sanitarne vode (kupaćilo) 0,5 MW<sub>t</sub>,
- 4. Toplota za tehnološke potrebe 16 MW<sub>t</sub>

Prema tome, u pogonu elektrolitičke rafinacije je instalirana toplotna snaga potrošača od 16 MW<sub>t</sub>. Projektovana temperatura tople ulazna voda je 120°C i temperatura okoline -15°C. Temperatura elektrolita se održava na 60±2°C.

## 8.2. POTROŠAČI TEHNOLOŠKE PARE NAKON MODERNIZACIJE TOPIONICE

Uvođenjem nove tehnologije topljenja koncentrata bakra menja se i termoenergetska šema TIR-a, a posebno topionice. Iza peći za autogeno topljenje koncentrata bakra, za hlađenje gasovitih produkata, predviđa se ugradnja jednog utilizacionog parnog kotla koji će proizvoditi suvozasićenu paru<sup>38</sup>.

Nakon modernizacije topionice potrošači tehnološke pare, osim pogona za regeneraciju elektrolita, biće, (ovde neće biti računato zagrevanje napojne vode jer će se uzimati samo neto potrošnja pare, a ostali potrošači toplote (zlatara, pogon elektrolitičke rafinacije) biće povezani na industrijskom vrelovodu "E"):

- **1. Sušenje koncentrata.** Za potrebe sušenja koncentrata bakra predviđa se ugradnja parne sušare kapaciteta 51,6 t/h suvog koncentrata ili 57,0 t/h suve šarže. Koncentrat se suši sa 10% na 0,3% vlage. Temperatura koncentrata, nakon sušenja, je 110-130°C. Količina isparene vlage je 6,1 t/h. Sušara se sastoji od rotora i stacionarnog spoljašnjeg doboša (plašta). Rotor se sastoji od određenog broja paralelnih setova cevni namotaja koji su poređani duž centralne cevi. Kroz cevi struji suvozasićena para pritiska 2,0 MPa (temperature 212°C). Potrebna količina pare, za potrebe sušare, je u normalnom radu (kod kapaciteta sušare 51,6 t/h) 10,9 t/h (1,8 kg pare/kg isparene vlage). Iz sušare se odvede 18.430 m<sup>3</sup> /h gasova sa temperaturom oko 120°C, nakon otprašivanja ispuštaju se u atmosferu.

Potrebna količina pare za potrebe sušare šarže obezbediće se iz utilizacionih parnih kotlova iz fabrike sumporne kiseline. Na osnovu ponude LAVALIN-a [1] (liste 338158-7000-49DD-9004 PA i 338158-7000-49DD-9006 PA) dva parna kotla proizvode suvozasićenu paru pritiska 2,1 MPa (temperatura zasićenja 218°C) u količini 14,096 t/h.

- **2. Zagrevanje mazuta.** Za zagrevanje peći za autogeno topljenje koncentrata bakra koristi se mazut. Za Flesh peći<sup>39</sup> ugrađeni su: u reaktorskom šaftu dva gorionika, na svodu setlera četiri i

<sup>37</sup> "Glavni mašinski projekat rekonstrukcije sekundarne podstanica u objektu Elektrolize", Energoinvest, Sarajevo, 1988; "Mašinski projekat ventilacije hale Elektrolize", Klima, Celje, mart, 1983;

<sup>38</sup> U ponudi broj 984014B-243 od 14. 08. 1998. godine firma Foster Wheeler iz Finske se nudi utilizacioni parni kotao za proizvodnju (normalno 41 t/h, max. 47 t/h) suvozasićene pare pritiska 6,0 MPa. Grejna površina parnog kotla sastoji se iz dela za hlađenje aptejka peći, radijacioni i konvektivni deo. Grejna površina u radijacionom delu je 1.650 m<sup>2</sup> i u konvektivnom 1.280 m<sup>2</sup>. Napojna voda je sa temperaturom od 110°C. Toplotna snaga parnog kotla je 27,5 (max 30,7) MW<sub>t</sub>, a snaga proizvedene pare 26,6 (max 30,7) MW<sub>t</sub>, čišćenje grejnih površina se vrši pomoću 100 čekićeva (*spring hammers*). Gabariti utilizacionog parnog kotla, bez doboša, su: visina 26 m, širina 5,176 m i dužina 36 m. Cena: inženjering usluga, nabavka, izrada i isporuka opreme i nadzor, je 10.200.000 US\$.

<sup>39</sup> Ponuda Outokumpu iz Finske, Rev. 4 iz jula 1998.

na zidovima setlera šest gorionika. Kapacitet svakog gorionika je 300 kg/h tečnog goriva. Prema tome potrošnja mazuta<sup>40</sup> za zagrevanje Flash peći je 150 kg/h. Potrošnja pare za zagrevanje mazuta računaće se sa potrošnjom mazuta od  $m_{mFP}=150$  kg/h. Mazut se zagreva na 60°C za transport od cisterne za transport do rezervoara i do 120°C za potrebe raspršivanja i paljenja. Najniža temperatura mazuta uzeće se da je -15°C. Potrošnja mazuta za loženje Flash peći je neravnomerna i zavisi od režima rada, kapaciteta i slično. Od instalisanih devet gorionika veliko je pitanje kada svi istovremeno rade.

Za potrebe zagrevanja anodnih peći ostaje kao gorivo i na dalje mazut. Za godišnji kapacitet anodnih peći od 80.000 t/a anodnog bakra i specifične potrošnje mazuta 30,0 kg/t anodnog bakra potrebno je 2.400 t/a mazuta. U periodu 1976. do 1997. godine ostvarena je specifična potrošnja mazuta 20,4-39,4 kg/t anodnog bakra, to jest ostvarena je godišnja potrošnja mazuta 2164-5960 t/a pri tome, godišnja proizvodnja anodnog bakra bila je 86.549-174.257 t/a.

Časovna potrošnja mazuta za loženje anodnih peći, za godišnje vremensko iskorišćenje anodnih peći od 80%, iznosi  $m_{mAP}=2.400 \cdot 10^3 / (0,80 \cdot 365 \text{ dana} \cdot 24\text{h}) = 343$  kg/h. Potrošnja mazuta za loženje anodnih peći je neravnomerna i zavisi od faze rada peći, kvaliteta bakrenca i drugo.

Potrebna količina toplote za zagrevanje mazuta<sup>41</sup> sa -15°C na 120°C i za gubitke toplote od 30% iznosi;

$$q_{maz}=1,30[2,037 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})\cdot 120^\circ\text{C}-1,6995 \text{ (kJ}\cdot\text{K})\cdot(-15^\circ\text{C})]=350,912 \text{ kJ/kg}.$$

Potrošnja suvozasicene pare, pritiska 0,7 MPa (entalpija pare  $i_p=2762,9$  kJ/kg i entalpija kondenzata temperature 100°C  $i_k=421,4$  kJ/kg), iznosi:

- Flash peći:  $150 \text{ kg}_m/\text{h} \cdot 350,912 \text{ kJ}/\text{kg}_m / (2.762,9-421,4)\text{kJ}/\text{kg}_p = 22,480 \text{ kg}_{pare}/\text{h}$  (=17,253 kW<sub>t</sub>),
- Anodne peći:  $343 \text{ kg}_m/\text{h} \cdot 350,912 \text{ kJ}/\text{kg}_m / (2.762,9-421,4)\text{kJ}/\text{kg}_p = 51,404 \text{ kg}_{pare}/\text{h}$  (=39,451 kW<sub>t</sub>).

Potrebna količina pare (toplote) za zagrevanje mazuta za loženje Flash peći i anodne peći iznosi 73,884 kg/h (ili potrebna toplotna snaga 56,704 kW<sub>t</sub>).

Za slučaj pregrevanja proizvedene pare potrebna je količina mazuta 470 kg/h ili za rad pregrejača pare 330 dana godišnje 3.722,40 t/a.

Tada će biti potrebna količina pare, za zagrevanje 963 kg/h mazuta za Flash Smelting Furnace, anodne peći i ložište pregrejača pare, 144,321 kg<sub>pare</sub>/h suvozasicene pare pritiska 0,7 MPa ili 110,764 kW<sub>t</sub>, što godišnja potrošnja toplote iznosi 877,251 MW<sub>t</sub>h.

• **3. Fabrika kiseonika.** Za potrebe Fabrike kiseonika, to jest za zagrevanje nečistog azota koji služi za regeneraciju mase u adsorpcionim kolonama, zagrevanje ulja za podmazivanje kompresora, isparavanje tečnih proizvoda (tečnog kiseonika i tečnog azota) i za odgrevanje Fabrike za vreme zaustavljanja i startovanja, predviđa se korišćenje zasićene pare<sup>42</sup> pritiska 0,7 MPa:

- za reaktivaciju max.1.950 kg/h, u proseku 610 kg/h,
- za kompresor za vazduh 350 kg/h,
- za povremeno isparavanje tečnih proizvoda<sup>43</sup> 5.200 kg/h

<sup>40</sup>U ponudi firme Mitsui iz Japana za Flash peći stoji da je potrošnja koksa 1,62 t/h

<sup>41</sup>Specifična toplota mazuta je izračunata na osnovu jednačine [6],  $c_p=1,737+0,0025 \cdot t_{maz}[^\circ\text{C}]$ , kJ/(kg·K)

<sup>42</sup>Ponuda firme Hitachi br. 02A-1133-0095 od septembra 1998. za ASU

<sup>43</sup>Ponuda firme LINDE-KCA br. 00598408 od 8. 06. 1998. za ASU

• **4. Toplota za potrebe zagrevanja za tehnološke potrebe, priprema tople potrošne vode i toplifikaciju pogona baznog dela RTB-Bor**

Pogoni borskog dela RTB-Bor, koji su povezani na industrijskom vrelovodu "E", za potrebe pripreme tople sanitarne vode su:

1. Termoelektrana:	
• novo kupatilo- jedan bojler od 3 m <sup>3</sup> toplotne snage	165 kW <sub>t</sub>
• staro kupatilo- jedan bojler od 5 m <sup>3</sup>	235 kW <sub>t</sub>
• uprava- jedan bojler	40 kW <sub>t</sub>
2. Fabrika bakarne žice:	
• jedan bojler od 2 m <sup>3</sup>	145 kW <sub>t</sub>
3. Elektroliza:	
• u zlatari jedan bojler	200 kW <sub>t</sub>
• u elektrolitičkoj rafinaciji	500 kW <sub>t</sub>
4. Topionica;	
• tri bojlera po 5 m <sup>3</sup>	705 kW <sub>t</sub>
5. Fabrika sumporne kisdeline:	
• kupatilo	116 kW <sub>t</sub>
6. Livnica bakra i bakarnih legura:	
• nova livnica dva bojlera po 145 kW <sub>t</sub>	290 kW <sub>t</sub>
• stara livnica jedan bojler	145 kW <sub>t</sub>
7. Transport TIR-a;	
• jedan bojler od 4 m <sup>3</sup>	212 kW <sub>t</sub>
• jedan bojler 0,8 m <sup>3</sup>	43 kW <sub>t</sub>
8. Jama:	
• jedan bojler od 3 m <sup>3</sup>	165 kW <sub>t</sub>
• jedan bojler od 5 m <sup>3</sup>	235 kW <sub>t</sub>
9. Površinski kop, radionica	325 kW <sub>t</sub>
10. Flotacija Bor, novo kupatilo	142 kW <sub>t</sub>
11. Kupatilo površinskog kopa	640 kW <sub>t</sub>
12. Kantina topionice (jedan bojler 0,9 m <sup>3</sup> )	procena 43 kW <sub>t</sub>
<b>SVEGA RTB-Bor:</b>	<b>4.304 kW<sub>t</sub></b>
<b>Novi gradski centar</b>	<b>1.465 kW<sub>t</sub></b>
<b>UKUPNO:</b>	<b>5.769 kW<sub>t</sub></b>
Potrošači toplote za klimatizaciju, koji rade leti:	
1. Ulazna vetrena struja u Jami 3x837 kW	2.511 kW <sub>t</sub>

Toplotna energija u industrijskim pogonima RTB-Bor troši se za grejanje objekata, pripremu tople sanitarne vode i za zagrevanje i regeneraciju elektrolita u procesu elektrolitičke rafinacije bakra.

Na industrijskom vrelovodu (toplovodna mreža "E") su povezani skoro svi industrijski pogoni RTB-Bor lociranih u severo-istočnom delu Bora (TIR, FOD i RBN). Spisak potrošača i toplotna snaga, na osnovu [14] sa korekcijama na osnovu izvedenog stanja, prikazani su u tabeli 13. Dužina trase industrijskog vrelovoda ("E") iznosi oko 2.030. m, odnosno ukupna dužina razvodnog i povratnog cevovoda iznosi 4.030 m.

**Potrošači toplotne energije priključeni na industrijskom vrelovodu "E"**

**TABELA 13**

POTROŠAČ	INSTALISANA TOPLOTNA	TEMPERATURSKI REŽIM, °C
----------	-------------------------	----------------------------

	SNAGA, kW <sub>t</sub>	PRIMAR	SEKUNDAR
1	2	3	4
<b>MAGISTRALA 1.</b>			
<b>1. TERMOELEKTRANA:</b>	<b>2.224,000</b>	130/80	90/70
1.1. Nova kotlarnica (grejanje i klimatizacija)	1.246,000		90/70
1.2. Upravna zgrada (grejanje i klimatizacija)	500,000		90/70
1.3. Kupatilo (grejanje i klimatizacija)	186,000		90/70
1.4. Zgrada radionica	115,000		90/70
1.5. Dekarbonizacija	28,000		90/70
1.6. HPV	19,000		90/70
1.7. Stara kotlarnica (sušara)	20,000		90/70
1.8. Kostolačko postroj. (kancelarije, radionica, pult)	110,000		90/70
<b>2. FABRIKA BAKARNE ŽICE (stara)</b>	<b>200,000</b>	130/80	90/70
<b>3. ELEKTROLIZA:</b>	<b>35.430,000</b>	130/80	
3.1. Zlatara (klimatizacija)	2.200,000	130/80	
3.2. Zlatara (reaktor i topla potrošna voda)	1.860,000	130/80	90/70
3.3. Uprava i kantina	1.160,000	130/80	90/70
3.4. Klima komora 1 i 2	3.770,000	130/80	
3.5. Klima komora 3 i 4	3.090,000	130/80	
3.6. Klima komora 5 i 6	2.300,000	130/80	
3.7. Klima komora 7 i 8	3.500,000	130/80	
3.8. Grejanje elektrolita (podstanica)	16.000,000	130/80	90/70
3.9. Zagrevanje dodatne vode za elektrolit	1.000,000	130/80	90/70
3.10. Regeneracija elektrolita	550,000	130/80	90/70
<b>4. TOPIONICA</b>	<b>4.190,000</b>	130/80	90/70
4.1. Upravna zgrada topionice	2.500,000	130/80	90/70
4.2. Kompresorska hala	230,000	130/80	90/70
4.3. Radionica topionica	1.280,000	130/80	90/70
4.4. Kantina	180,000	130/80	90/70
<b>5. Radionica površinskog kopa</b>	<b>3.730,000</b>	130/80	
<b>6. FABRIKA SUMPORNE KISELINE<sup>44</sup></b>	<b>1.266,880</b>	130/80	
6.1. Radionica (novi deo)	161,006		90/70
6.2. Garderoba	190,400		90/70
6.3. Komandna zgrada 3	166,670		90/70
6.4. Upravna zgrada	129,000		90/70
6.5. Zgrada investicije	45,000		90/70
6.6. Radionica (stara)	139,760		90/70
6.7. Komandna 1/2	166,670		90/70
6.8. Zgrada	267,780		90/70

<sup>44</sup> U Fabrici sumporne kiseline instalisana su dva razmenjivača toplote ukupne snage 2,442 MW<sub>t</sub>

Nastavak tab. 13.

1	2	3	4
<b>7. LIVNICA BAKRA I BAKARNIH LEGURA</b>	<b>3.630,000</b>	130/80	90/70
7.1. Stara livnica	550,000		90/70
7.2. Nova livnica	2.850,000		90/70
7.3. Upravna zgrada	230,000		90/70
<b>8. GLAVNO SKLADIŠTE</b>	<b>320,000</b>	130/80	90/70
<b>9. FOD<sup>45</sup></b>	<b>7.856,005</b>	130/80	
9.1. Nova hala	2.880,000	130/80	90/70
9.2. Izrada i konstrukcije	3.783,000	130/80	90/70
9.3. Hala B40 i zgrada održavanja	218,000	130/80	90/70
9.3. Kupatilo	18,000	130/80	90/70
9.4. Garderoba	218,000	130/80	90/70
9.5. Radionica montaže	215,000	130/80	90/70
9.6. Kovačnica	1.575,000	130/80	90/70
9.7. Administrativna zgrada montaže I i II sprat	73,000	130/80	90/70
9.8. Radionica automehaničara i autoelektričara	20,000	130/80	90/70
9.9. Stolarska radionica	151,000	130/80	90/70
9.10. Radionica montaže	123,000	130/80	90/70
<b>10. Garaža transporta</b>	<b>180,000</b>	130/80	
<b>11. Vatrogasci</b>	<b>120,000</b>	130/80	
<b>12. Kupatilo površinskog kopa</b>	<b>640,000</b>		90/70
<b>13.. Vešeraj</b>	<b>160,000</b>		90/70
<b>14.. Četa za spasavanje i istražni radovi</b>	<b>1.040,000</b>		90/70
<b>15. Zgrada opštih poslova TIR-a</b>	<b>600,000</b>	130/80	90/70
<b>SVEGA MAGISTRALA 1:</b>	<b>63.387,380</b>	-	
<b>MAGISTRALA 2.</b>			
1. Transporta TIR-a	3.470,000	130/80	
2. Filtraža bakra	340,000	130/80	
3. Laboratorija Instituta	580,000	130/80	
4. Izvozno okno	2.942,000	130/80	
5. Flotacija	1.745,000	130/80	
<b>SVEGA MAGISTRALA 2:</b>	<b>9.077,000</b>	-	
<b>UKUPNO MAGISTRALA 1 i 2:</b>	<b>72.464,380</b>	-	

Ostvarena potrošnja toplote (angažovana toplotna snaga) u baznom delu RTB-Bor, za period od izdvajanja dela JKP "Toplana" Bor za obavljanje javne funkcije 2003. do 2009. godine, prikazani su u tab. 14. Za period kada radi toplifikacioni sistem (uslovno uzeto) novembar –april mesec i van grejne sezone maj-oktobar.

S obzirom da je smanjen kapacitet proizvodnje bakra, realna instalisana toplotna snaga, mogla bi biti 50 MW<sub>t</sub>, a kako je srednja temperatura u grejnom periodu (uslovno, novembar-april) 3,5°C, angažovana snaga iznosi 24 MW<sub>t</sub>. U periodu van grejne sezone (uslovno, maj-oktobar) realna instalisana snaga je oko 8 MW<sub>t</sub> i srednja temperatura okolnog vazduha 17,35°C. Realna angažovana snaga može da se uzme da iznosi 8 MW<sub>t</sub>. U računici je uzeto da su stepen korisnosti parnih kotlova u Termoelektrani  $\eta_k=0,70$ , i stepen iskorišćenja toplote pare (iz parnih kotlova Termoelektrane i pare iz Topionice) od ulaza u termoelektranu RTB-Bor i na pragu (izlazu) Termoelektrane RTB-Bor  $\eta_{raz}=0,95$ .

**Potrošnja toplote (toplotna snaga) na grejanju baznog dela RTB-Bor TABELA 14.**

<sup>45</sup> Instalisana snaga u FOD-u: nova hala -dva razmenjivača po 1,441 MW<sub>t</sub>, hala mehaničke obrade -tri razmenjivača ukupne snage 3,783 MW<sub>t</sub>, zgrada Montaže 0,2 MW<sub>t</sub> i prostorija Antikorozije 0,218 MW<sub>t</sub>

Godina	Utrošena toplota (angažovana snaga) na pragu TE, MW <sub>th</sub>					
	Zimi XI-IV		Leti V-X		Ukupno:	
	MW <sub>th</sub>	MW <sub>t</sub>	MW <sub>th</sub>	MW <sub>t</sub>	MW <sub>th</sub>	MW <sub>t</sub>
2003.	51929	11,856	23657	5,401	75587	8,628
2004.	62131	14,185	30005	6,850	92136	10,518
2005.	66133	15,099	34489	8,102	100622	11,486
2006.	60835	14,004	34676	7,852	95511	10,903
2007.	48225	11,101	32714	7,408	80939	9,240
2008.	49716	11,445	23199	5,253	72915	8,324
2009.	48502	11,165	31912	7,226	80414	9,180
2010.	44565	10,175	27353	6,245	71918	8,210 <sup>+) </sup>
2011.	57845	11,932	19534	4,993	77379	8,332
Prosečno godišnje	54431	12,329	28615	6,592	83047	9,425
Minimum mesečno	4001	5,556	2644	3,672	2644	3,672
Maksimum mesečno	13489	18,130	8765	11,781	13489	18,130

<sup>+) Urađeno za 365 d/a i 24 h/d, to jest:  $71918 \text{ MW}_t \text{h} / (365 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}) = 8,210 \text{ MW}_t$ .</sup>

### 8.3. Raspoloživa termoenergetska oprema u Termoelektrani RTB-Bor

Iz oblasti termoenergetike TIR, RTB-Bor raspolaže sledećom opremom, koja bi eventualno mogla da se koristi nakon izgradnje Nove topionice:

1. Tri kondenzacione parne turbine BBC snage dve po 4,1/4,7 MW i jedna 2,4/3,0 MW. Parametri radne pare su: pritisak 1,6 MPa i temperatura 300°C, tab. 7. Pouzdane podatke o godini proizvodnje i ugradnje nepostoje, ali se zna da potiču iz prve polovine XX veka. Lokacija je Termoelektrana RTB-Bor.

2. Rashladni toranj. Rekonstruisan i kapacitet hlađenja je smanjen za polovinu. Ispuna zamenjena. Građevinski deo tornja je remontovan. Dovoljan je za hlađenje vode za hlađenje kondenzata za turbinu snage oko 6 MW.

3. Dva parovoda na liniji Topionica-Termoelektrana za transport pregrejane pare pritiska 4,0 MPa i temperature 400°C. Jedan je urađen iz cevi prečnika 200/216x6 mm materijala 15Mo3 i ima kapacitet od 50 t/h pare. U eksploataciji je od 1961. godine. Drugi parovod je urađen iz cevi prečnika 200/219,6x6,3 mm materijala 15Mo3 i ima kapacitet od 48 t/h pare. U eksploataciji je od 1971. godine. Stanje i preostali vek parovoda ni su poznati.

4. Dva kondenzna voda: jedan je u eksploataciji od 1961. godine. Izrađen je iz bešavne cevi prečnika 100/108x3,75 mm materijala st 35.8-I i kapaciteta 30 t/h. Drugi je u eksploataciji od 1971. godine. Izrađen je iz cevi prečnika 100/108x3,6 mm materijala st 35.8-I. Oba kondenzna voda su u lošem pogonskom stanju.

5. Tri parna kotla locirana u Termoelektrani RTB-Bor, tab. 8. Dva su kapaciteta po 15 t/h pare pritiska 20 bar i temperature 350°C. Oba su ugrađena 1943. godine. Treći je nominalnog kapaciteta 40 t/h pare pritiska 4,0 MPa i temperature 425°C. Ugrađen je 1956. godine. Gorivo je ugalj, uglavnom mrki.

6. Tri toplotne stanice snage po 14 MW<sub>t</sub> i tri toplotne stanice kapaciteta po 29 MW<sub>t</sub> (nisu u funkciji). Sve su toplotne stanice locirane u Termoelektrani RTB-Bor. Grejni fluid je para 1,6 MPa i 300°C, a grejani vrela voda temperature 130/80°C.

7. Vrelvodni sistem za daljinsko grejanje baznog dela RTB-Bor u Boru. Instalirani kapacitet potrošača je ukupno oko 72 MW<sub>t</sub>. Osim za toplifikaciju, vrela voda se koristi za pripremu tople potrošne vode i za zagrevanja fluida u tehnologiji. Zadnja dva zbirna potrošača rade tokom cele godine, a toplifikacija se vrši u grejnom periodu. Projektni uslovi za Bor su: temperatura -15°C i 193 grejna dana u godini. Srednja temperatura spoljnog vazduha u grejnom periodu je 3,5°C.

8. Jedna sabirnica pare No 350 mm, kapaciteta 126 t/h, pritiska 41 bar i temperature pare 450°C,

9. Jedna stanica za reduciranje pritiska pare kapaciteta 60 t/h, 40/19 bar i 420/320°C i druga kapaciteta 30 t/h, 40/19 bar i 420/320°C.

10. Utilizacioni parni kotao iza plamene peći broj 1 kapaciteta 24,95/11,10 t/h pare pritiska 44 bar i temperature 440°C. Njegovo korišćenje prestaje puštanjem u pogon nove peći za topljenje.

11. Dve linije za proizvodnju omekšane vode kapaciteta po 75 m<sup>3</sup>/h (od toga jedna je rezerva).

12. Tri linije za proizvodnju demineralizovane vode kapaciteta po 30 m<sup>3</sup>/h (od toga jedna je rezerva).

13. Veštačka akumulacija „Borsko jezero“ izgrađena 1962. godine kapaciteta 11,959 miliona m<sup>3</sup> vode. Za transport vode s Jezera do bazena Termoelektrane i Vodovoda RTB-Bor izgrađen je betonski kanal u dužini od 11,7 km.

## 9.0. POTROŠNJA ENERGENATA U TOPIONICI BAKRA NAKON MODERNIZACIJE

Na osnovu [15] i APPENDIX 7.0 - OPEX (RAW MATERIALS, UTILITIES AND CONSUMABLES) godišnja potrošnja energenata u topionici, nakon modernizacije, je specificirana na sledeći način<sup>46</sup>:

Energent	Cena energenta <sup>4)</sup>	Godišnja količina	Količina na sat
1. Električna energija	0,05 USD/kWh	17.534.505 kWh/a	2.214 kW,
2. Tehnički kiseonik (kao 100%O <sub>2</sub> )	14,5 USD/t	103.800 km <sup>3</sup> /a	13.106 m <sup>3</sup> /h,
3. Instrumentalni vazduh (7 bar)	5,3 USD/km <sup>3</sup>	3.960 km <sup>3</sup> /a	500 m <sup>3</sup> /h,
4. Tehnološki vazduh (350 kPa)	4,0 USD/km <sup>3</sup>	7.762 km <sup>3</sup> /a	980 m <sup>3</sup> /h,
5. Rashladna voda (Treated Water)	2,0 USD/m <sup>3</sup>	60.667 t/a	7,6 t/h,
6. Voda (Plant Water)	2,0 USD/m <sup>3</sup>	23.760 t/a	3,0 t/h,
7. Para za sušaru (20 bar)	29,5 USD/t	83.820 t/a	10,58 t/h,
8. Tečno gorivo za FSF	500 USD/t	ukupno 1.894 t/a	150 kg/h,
9. Tečno gorivo za anodne peći	500 USD/t	ukupno 5.429 t/a	303 kg/h.
10. Mazut u pregrejaču pare	500 USD/t	3.720 t/a	470 kg/h. <i>Dop. M.M.</i>
11. Tečno gorivo u konvertorima	1,47 USD/dm <sup>3</sup>	454 t/a	<i>(dopuna M. Mitovskog)</i>
12. Demineralizovana voda	141,25 RSD/m <sup>3</sup>	27.060 m <sup>3</sup> /a	3,42 m <sup>3</sup> /h

<sup>46</sup> Izvor: SNC LAVALIN Feasibility study New Smelter and Sulphuric Acid Plant Project, Appendix 7.0 /OPEX (Raw materials, utilities and consumable) May 31, 2010, Sli Ref. 338158



## 10.0. PREDLOG KORIŠĆENJA SEKUNDARNE (OTPADNE) TOPLOTE PEIRCE SMITH KONVERTORA

U eri sve skuplje i nedostajuće energije, postoje opravdanosti korišćenja otpadne toplote konvertora. Naime, korišćenjem otpadne toplotne energije iz jednog konvertora, na osnovu dokumenta 663/200-000-F1-R1, može se dobiti suvozasićena para pritiska 6 MPa u količini od oko 9 t/h, što je ekvivalent za proizvodnju električne energije, u proseku, od 9 GW<sub>e</sub>h/a (ili angažovana snaga na klemama generatora 1,09 MW<sub>e</sub>). Ove veličine svedene na toplotu, proizvodnja toplotne energije iznosi 125 MW<sub>t</sub>h/dan (angažovana toplotna snaga od oko 5 MW<sub>t</sub>), što je dovoljno za zagrevanje 1300 standardnih stanova. Ova konstatacija u potpunosti se uklapa u izvanrednoj koncepciji generalnog direktora RTB-Bor o grejanju Bora iz Topionice (Politika, 29. avgusta 2010.).

Ovaj predlog podrazumeva da vodeni i parni trakt utilizacionog parnog kotla konvertora u potpunosti bude kompatibilan sa utilizacionim parnim kotlom Flash peći.

Opravdanje ove ideje, o korišćenju sekundarne energije konvertora, se ogleda u:

1. Nepostoji potreba o gradnji tri rashladne komore i tri skrubera za dodatno hlađenje gasovitih produkata konvertora,
2. Jedan utilizacioni parni kotao (Waste Heat Boiler, WHB) opslužuje tri konvertora,
3. Postoji mogućnost da napojni i parni sistem parnih kotlova konvertora i Flash peći bude jedinstvena celina i komandovanje bude iz jedne prostorije (centar),
4. Investicije za izgradnju utilizacionog parnog kotla neće biti bitno različita od investicije u rashladnim komorama i skruberima,
5. Korišćenjem utilizacionog parnog kotla za hlađenje gasovitih produkata konvertora, na ulazu u fabrici sumporne kiseline, dobiće se manja količina gasova, sa manjom vlagom i većim sadržajem SO<sub>2</sub> komponente,
6. U transportnom sistemu prašine konvertora neće postojati rizik o formiranju taloga prašine, abrazije i korozije.

### Termoenergetski pregled gasovitih produkata konvertora

Tabela 15.

	Broj ciklusa na dan	Trajanje ciklusa h/c	Količina gasova m <sup>3</sup> /batch	Temperatura gasa na ulazu u WHB, °C	Fizička toplotna energija gasova na ulazu u WHB, MJ/batch	Specifična fizička toplotna energija gasova na ulazu u WHB, kJ/m <sup>3</sup>	Temperatura gasova na izlazu iz WHB, °C	Fizička toplotna energija gasova na izlazu iz WHB, MJ/batch	Specifična fizička toplotna energija gasova na izlazu iz WHB, kJ/m <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9 (= 4*10)	10
Rad na šljaci	2,59	3,33	39486	1234	74872	1897	350	18124	459
Rad na bakar	2,59	5,97	90937	1172	164985	1814	350	42104	463
Prosek	2,59	9,30	130423	1191	239857	1839	350	60228	749

### Nastavak tabelle 15.

	ΔQ, MJ/batch	Proizvodnja suvozasićene pare pritiska 6,0 MPa			Snaga generatora, N <sub>Gb</sub> , kW <sub>e</sub>	Dnevna proizvodnja električne energije E, kW <sub>e</sub> h/dan	Toplotna snaga Q <sub>t</sub> , kW <sub>t</sub>	Dnevna proizvodnja toplotne energije Q <sub>e</sub> , kW <sub>t</sub> h/d
		D, t/batch	D, t/h	d <sub>s</sub> , kg/s				
11	12 (= 6-9)	13	14 (=13/3)	15	16	17	18	19
Rad na šljaci	56748	25,891	7,775	2,160	967,141	23211,360	4592,175	110212,200
Rad na bakar	122881	56,065	9,391	2,609	1168,157	28035,768	5546,752	133122,048
Prosek:	179629	81,956	8,810	2,447	1095,886	26301,246	5202,339	124856,136

$D = \Delta Q / \Delta i = \Delta Q / 2191,76$ , kg pare/batch

$Q_t = \eta_{RZ} \Delta i d_s = 0,97 \cdot 2191,76 d_s$ , kW<sub>t</sub>

$N_{Gb} = l_{IPT} \eta_{MPT} \eta_{IPT} \eta_G d_s = 548,556 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot d_s = 447,808 d_s$ , kW<sub>e</sub>

d<sub>s</sub>, kg/s- produkcija suvozasićene pare

(jedn. 1)

(pogl. 4.2.)

(pogl. 3.1.1., jedn. 21)

(tab. 15, kolona 15)

## 11.0 REZIME

Bakar kao metal ima istorijski značaj u razvoju čovečanstva, čak jedan period u razvoju društva nosi naziv „Bakarno doba“. Za bakar je vezan istorijski i sada jedan dobar deo Srbije, a to je okolina Bora i Majdanpeka do sada, a ima indicije da se taj prostor proširi, istraživanja su u toku-

Početak pripreme za razvoj rudarstva u okolini Bora počinje 1835. godine, kada je Sigmund August Wolfgang Heder Baron fon Herder posetio Majdanpek i Bor u toku 1835. godine i zapazio da su tu velika nalazišta bakra. Nakon dugogodišnja istraživanja i ispitivanja okoline Bora 1903. godine počela je eksploatacija rude bakra (koja je sadržala u sebi i do 10,5% Cu) uz asistenciju Feliksa Hofmana i Đorđa Vajferta, a ne manju zaslugu ima i Franjo Šistek.

Rudarstvo u Boru kreće 1903. godine jamskom eksploatacijom bakarne rude, a metalurgija bakra počinje proizvodnju 1906. godine. U procesu metalurške proizvodnje bakra koristile se za topljenje vater žaketne (VJ) peći, konvertori i anodne peći, a trošio se koks, električna energija, tečno gorivo i rashladna voda, a tek 1938. godine počela je sa radom pogon elektrolitičke rafinacije za proizvodnju katodnog bakra i zlata.

Promena tehnologije proizvodnje anodnog bakra izvršene 1961. godine obuhvata puštanje u pogon pet pržne peći (a kasnije je ugrađen fluo solid reaktor broj 1 za prženje šarže kao zamena pržnih peći), plamena peć broj 1, ložene prahom kamenih ugljeva, tri konvertora, dve anodne peći i dve livne mašine za livenje anodnog bakra i fabrike sumporne kiseline sistema Turm. Gasoviti produkti plamene peći broj 1 hladili se u utilizacionom parnom kotlu (UK-1) kapaciteta max 24,95 t/h pregrejane vodene pare pritiska 44 bar temperature 440°C, grejne površine 972 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 388 m<sup>2</sup> i zagrejača sekundarnog vazduha 2826 m<sup>2</sup>.

Za hlađenje konvertorskih gasova ugrađen je 1960. godine utilizacioni parni kotao (UK-2) grejne površine 1470 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 274 m<sup>2</sup>. Ovaj utilizacioni parni kotao služio za hlađenje gasovitih produkata sa 500°C do tačke rose. Utilizacioni parni kotao iza konvertora (UK-2) imao kapacitet produkcije pare max 11,75 t/h pregrejane vodene pare pritiska 44 bar temperature 400°C.

Godine 1971. godine izgrađena je plamena peć broj 2 ložene mazutom u kojoj se topio prženac iz fluo solid reaktora broj 2. Za hlađenje gasovitih produkata plamene peći broj 2 montirana su dva utilizaciona parna kotla (UK-3 i 4) grejne površine po 487 m<sup>2</sup>, pregrejača pare 252 m<sup>2</sup> i zagrejača vazduha 571 m<sup>2</sup>. Kapacitet produkcije pare max po 15,5 t/h pregrejane vodene pare pritiska 42 bar temperature 440°C

Sva četiri utilizaciona parna kotla se napajaju kotlovskom vodom temperature 180°C i pritiska 55 bar. Para iz sva četiri utilizaciona parna kotla koristi se za pokrivanja tehnoloških potreba RTB Bor, za toplifikaciju RTB Bor i grada Bor i za proizvodnju električne energije u TE. Za period 1993. do 2009. godine je proizvedena para godišnje u TIR-u 99.340 - 465.378 t/a, a u topionici 61.364 - 177.823 t/a, od toga za grejanje je utrošeno 95.138 - 427.927 t/a, za proizvodnju električne energije 1.823 - 52.845 t/a i za tehnološke potrebe u topionici 12.916 - 62.033 t/a i elektrolizi 18.663 - 83.244 t/a.

Na osnovu toplotnog bilansa, stepen iskorišćenja toplote u procesu može se predstaviti kao odnos korisne i dovedene toplote, i on iznosi: za proces prženja u fluosolid reaktoru  $\eta_{ip}= 0,3871$ , za proces topljenja prženca u plamenim pećima  $\eta_{ip}= 0,2426$ , za plamenu peć broj 1 i  $\eta_{ip}= 0,2564$  za plamenu peć broj 2, za proces konvertovanja bakrenca  $\eta_{ip}= 0,3147$ , za proces plamene rafinacije blister bakra  $\eta_{ip}= 0,3285$ .

Za odvijanje pirometalurškog procesa proizvodnji anodnog bakra troši se velika količina energije (*gorivo, električna energija, vazduh, voda i ekvivalent energije procesnih materijala*), u

iznosu od 22,50÷23,70 GJ/t anodnog bakra ili 770÷800 kg uslovnog goriva za 1t anodnog bakra. Od ove količine, potrošnja električne energije iznosi 430÷700 kWh/t anodnog bakra.

Stepen iskorišćenja toplote za ceo pirometalurški proces proizvodnje anodnog bakra u topionici RTB-Bor iznosi  $\eta_{ip}=0,1337$  iz bakrenca plamene peći broj 1 i  $\eta_{ip}=0,1328$  iz bakrenca plamene peći broj 2. Energetski ( $\eta$ ) i eksergetski ( $v$ ) stepen iskorišćenja procesa proizvodnje anodnog bakra u Topionici bakra u Bor iznose: ukupni energetski i eksergetski stepen iskorišćenja  $\eta=0,1741$  i  $v=0,1265$ , a ako se uzme bez energije i eksergije isporučene pare Termoelektrani  $\eta_p=0,0992$ , i  $v_p=0,0911$ .

Za potrebe snabdevanja rudnika i metalurgije električnom energijom izgrađana je Termoelektrana u Boru 1935. godine. Ona je tokom 1937. godine, kada je puno vreme radila, mesečno je proizvela 1.775,6-2.435,2 MWh električne energije. U januaru 1939. godine Termoelektrana je proizvela 3.775.390 kWh električne energije, a borska privreda, u isto vreme, je potrošila 3.967.760 kWh, od toga: rudnik 599.961 kWh, topionica 1.419.623 kWh, flotacija 710.200 kWh, elektroliza bakra 507.463 kWh itd i pri tome je proizvedeno 39.410 t blister bakra (sadržaja 98% Cu). Nakon puštanja u pogon elektrolize bakra jula 1938. godine, u 1939. je proizvedeno 12.463 tona katodnog bakra.

Izgradnjom Flash peći i njeno puštanje u pogon 5. marta 2015. godine, zaustavljene su plamene peći i fluo-solid reaktora. Količina toplotne energije sa gasovitim produktima procesa topljenja koncentrata bakra (51,6 t<sub>sk</sub>/h) u Flash Smelting Furnace u Boru, nakon modernizacije topionice bakra u Boru, sastoji se od toplotne energije gasova i poletine. Raspoloživa toplotna energija je određena za temperature 1270°C i 350°C i količinu gasovitih produkata  $V_{Gw}=38.810 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $v_{Gw}=10,781 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i tako se dobija raspoloživa toplotna snaga u iznosu od 19.112,25 kW<sub>t</sub>. Za hlađenje gasova iz Flash peći u topionici u Boru u funkciji je utilizacioni parni kotao bez pregrevanja proizvedene pare. Pritisak zasićene pare je 6,0 MPa(a) i količine 34,459 t/h, čija je temperatura 275,586°C i temperatura napojne vode (na ulazu u doboš kotla) 140°C. Raspoloživa količina toplote ( $\Delta Q$ ) kod srednje količine gasova je 17.131,49 kW<sub>t</sub>, poletine  $Q_{pl}=544,09 \text{ kW}_t$ , od hemijskih reakcija  $Q_{hr}=2.266,67 \text{ kW}_t$  i gubici toplote 830,00 kW<sub>t</sub>. Korišćenjem pare za proizvodnju električne energije dobija se 0,1524 kW<sub>e</sub>h/kg sveže pare, a izentropska snaga parne turbine iznosi 5.250,778 kW i ukupni izentropski stepen korisnosti parne turbine iznosi 0,85, Stepen korisnosti utilizacionog parnog kotla fleš peći iznosi 0,8200 i termodinamički stepen korisnosti toplotnog ciklusa bruto ima vrednost 0,2505. Stepen korisnosti parnog bloka ( $\eta_{PBb}$ ), koji je odnos dobijenog tehničkog rada na priključcima generatora i dovedene toplote kroz kontrolnu granicu u parni blok (u ovom slučaju toplota gasovitih produkata i poletine), iznosi  $\eta_{PBb}=0,1677$ .

U toku trajanja grejne sezone (novembar-april) proizvodnja električne energije u TIR-u iznosi 6.304.266,976 kW<sub>e</sub>h/a, i proizvodnja toplotne energije 64.379.723,34 kW<sub>t</sub>h/a. Van grejne sezone (maj-oktobar) proizvodnja električne energije iznosi 16.974.223,75 kW<sub>e</sub>h/a, i proizvodnja toplotne energije 30.729.600,00 kW<sub>t</sub>h/a.

Korišćenjem otpadne toplotne energije iz jednog konvertora može se dobiti suvozasićena para pritiska 6 MPa u količini od oko 9 t/h, što je ekvivalent za proizvodnju električne energije, u proseku, od 9 GW<sub>e</sub>h/a (ili angažovana snaga na klemama generatora 1,09 MW<sub>e</sub>). Ove veličine svedene na toplotu, proizvodnja toplotne energije iznosi 125 MW<sub>t</sub>h/dan (angažovana toplotna snaga od oko 5 MW<sub>t</sub>), što je dovoljno za zagrevanje 1.300 standardnih stanova.

U proizvodnji bakra<sup>47</sup> u 2010. godini u RTB Bor je prerađeno suvog koncentrata 160.794 t<sub>sk</sub>, proizvedeno je anodni bakar 27.130,820 t<sub>ab</sub>, katodni bakar 22.202,750 t<sub>kb</sub> i sumporna kiselina

<sup>47</sup> Mltovski, M. Potrošnja energenata u TIR-u za period 1986. do 2009. godine, Bor 2008.

73.557,497 t<sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub>. Potrošnja energije, u tonama ekvivalentnog uglja<sup>48</sup>, iznosi: u topionici 2.278,3 kg<sub>eu/t<sub>kb</sub></sub> (66,773 GJ/t<sub>kb</sub>), u f-ci sumporne kiseline 177,3 kg<sub>eu/t<sub>kb</sub></sub> (5,196 GJ/t<sub>kb</sub>) i u elektrolizi 177,4 kg<sub>eu/t<sub>kb</sub></sub> (5,199 GJ/t<sub>kb</sub>) ili ukupno u TIR-u 2.633,0 kg<sub>eu/t<sub>kb</sub></sub> (77,168 GJ/t<sub>kb</sub>) i u rudarstvu i metalurgiji 7.118,005 kg<sub>eu/t<sub>kb</sub></sub> (ili 208,514 GJ/t<sub>kb</sub>).

Za transport pare od topionice do Energane koriste se dva parovoda koji su projektovani na pritisak pare 40 bari. Da ne bi se gradili novi parovodi, proizvedena para pritiska 60 bari najpre ekspandira u patrnoj turbini do 40 bara i niže po potrebi, jer i tehnološka para ima niži pritisak.

Na početku zagrevanja rekonstruisane Flash Smelting Furnace u Srbija 1. marta 2023. godine iz firme Srbija Zidin Koper u Boru date su ohrabrujuće informacije<sup>49</sup> da će prerada koncentrata biti 114 t/h, godišnja proizvodnja katodnog bakra 180.000 do 200.000 t/a, proizvodnja sumporne kiseline 700.000 t/a, proizvodnja zlata 3 t/a, zapašenost gasova manje od 5 mg/m<sup>3</sup> gasa, emisija CO<sub>2</sub> 0,62 tCO<sub>2</sub>/t<sub>kb</sub>, i potrošnja energije 193,5 t<sub>ekvivalentnog uglja</sub>/t<sub>kb</sub> (ili 5.671,02 GJ/t<sub>kb</sub>). Izgrađeno postrojenje za odsumporavanje gasova smanjilo je emisiju sumpor-dioksida smanjena za više od 90 procenata. U ovoj investiciji uloženo je 320 miliona USD, a samo za zaštitu životne sredine sto miliona USD. Procenjuje se da će godišnja proizvodnja biti u visini od dve milijarde USD.

---

<sup>48</sup> 1,0 kg<sub>ekvivalentnog uglja</sub> ima toplotnu moć 29.307,6 kJ ili 7.000 kcal

<sup>49</sup> <https://www.danas.rs/vesti/ekonomija/djedovic-u-boru-ulaganja-u-zivotnu-sredinu-dobijaju-pun-smisao-zavrsetkom-ove-topionice/>

## 12.0 LITERATURA

1. SNC-LAVALIN INC. Purchase order no: 338158-P5376, *Front-end engineering study for RTB Bor smelter modernization project*, April 16, 2010, Rev 0,
2. ...Ponuda Foster Wheeler Energia Oy, *Bor Copper Smelter Waste Heat Boiler 45000 m<sup>3</sup> /h (avg.)*, 984014B-243 od 14. 08. 1998. godine,
3. Rivkin, S. i Aleksandrov, A. *Termodinamichni svoystva na vodata i vodnata para*, Izd-vo "Tekhnika", Sofija, 1988, s. 81,
4. Wolfgang Wagner Hans-Joachim Kretzschmar, *International Steam Tables*, 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, e-ISBN 978-3-540-74234-0,
5. ...*RTB-Bor, razvoj energetike do 2010 godine, studija*, Energoinvest, Sarajevo, 1989, str. 105;
6. ....*Projekat industrijskog sistema daljinskog grejanja*, Institut za bakar, Bor, 1986, str. 52;
7. ...*Prospektna dokumentacija firme Foster Wheeler Energia OY*, Varkaus, Finland;
8. M. Mitovski, *Termoenergetski efekti pirometalurške prerade koncentrata bakra*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1988, str. 301;
9. Semenov, A.S. i Shevchenko, A.M., *Teplovoy raschet parovoy turbiny*, Izd-vo "Vishcha shola", Kijev, 1975, str. 206;
10. Vasiljević, N, *Parne turbine*, Mašinski fakultet, Beograd, 1984, str. 383;
11. Filipov, G.A. i dr., *Issledovanniya i raschety turbin vlazhnogo para*, iz-dvo "Energiya", Moskva, 1973, str. 231,
12. Kosyaka, Yu. F. (redaktor), *Paroturbinye ustanovki atomnykh elektrostantsiy*, "Energiya", Moskva, 1978, str. 312,
13. Todorović, B., *Projektovanje postrojenja za centralno grejanje*, Mašinski fakultet, Beograd, 1979, str. 178,
14. Mitovski, M., *Energetska efikasnost pogona TIR-a u 2003-2009. godini*, RTB-Bor, TIR Bor
15. ...SNC LAVALIN, *New Smelter and Sulphuric Acid Plant Project*, UPDATED PROPOSAL, JUNE 09, 2010 SLI REF. 338158,
16. Mitovski, M. i Ćirković, M. *Energija u metalurgiji bakra*, Institut za bakar, Bor 2007,
17. ...*Technical Proposal for RTB-Bor Project Jugoslavia* Mart 1981 MITSUI & FURUKAWA, CO., LTD, Tokyo, Japan
18. Mitovski, M., *Razvoj termoenergetskog sistema RTB-Bor, studija*, str. 90, Bor 1998,
19. .... *Power generation handbook*, McGraw-Hill; 1 edition (Aug 28 2002) ISBN: 0071396047,
20. Tuma, M. in Sekavčnik, M., *Energetski sistemi, preskrba z električno energijo in toploto*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 2004,
21. Castorp, D., Kollera, M. und Waas, P., *Technische Thermodynamik*, Skriptum, Juli 1999.
22. Žilić, Tihomir; Lončar, Dražen; Duić, Neven, *Određivanje otkupne cijene električne energije iz industrijskih kogeneracijskih postrojenja*, Energetska i procesna postrojenja, 6. međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, sažeci na hrv. i engl jeziku. / Branko Iljaš (ur.). Zagreb, Energetika marketing, 2004.
23. ...РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ, Технический документ Всемирного банка, 6 октября 2003,
24. *A Guide to Cogeneration*, The European Association for the Promotion of Cogeneration, Brussels 2001.
25. Stepanov, V.S. *Khimicheskaya energiya i ekssergiya veshchestv*, Iz-dvo „Nauka“ Novosibirsk, 1985.

**Ova studija je nastala u okviru projekta Beogradske otvorene škole i Regulatornog instituta za obnovljivu energiju i životnu sredinu „Civilno društvo za energetske tranziciju“, koji se sprovodi uz finansijsku podršku Britanske ambasade u Beogradu. Stavovi i mišljenja autora izneti u ovoj publikaciji ne izražavaju neminovno stavove Ambasade Velike Britanije, Beogradske otvorene škole i Regulatornog instituta za obnovljivu energiju i životnu sredinu i za njih je nadležan autor.**