

MILANČE M. MITOVSKI¹
ALEKSANDRA M. MITOVSKI²

¹Rudarsko-topioničarski basen Bor
(RTB-Bor) grupa, Bor, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Tehnički
fakultet, Bor

STRUČNI RAD

UDK 546.217:66.071.6(497.11BOR)

DOI: 10.2298/HEMIND0905397M

EFIKASNOST KRIOGENE SEPARACIJE VAZDUHA NA KOMPONENTE

Razdvajanjem atmosferskog vazduha na komponente po kriogenom niskopritisnom procesu u Fabrici kiseonika u Boru dobija se više proizvoda različitih količina i čistoće. Formiranje cena, bilansiranje troškova i potrošnja energije u proizvodnji, a takođe i tržišne cene sa svim objektivnim i subjektivnim reperkusijama, predstavljaju problem kod raspodele potrošnje energenata i troškova po jedinici mase pojedinih proizvoda. U ovom slučaju, kao kriterijum je usvojen najmanji uloženi tehnički rad u procesu separacije komponenti vazduha i on se zadržava kod svih troškova proizvodnje i raspodele specifične potrošnje energije. Konkretnizacija ove materije je urađena za proces koji se odvija u Fabrici kiseonika RTB-Bor u Boru, praćenjem proizvodnih parametara Fabrike u toku poslovne 2007. godine. Na osnovu opservacije, u periodu od 20 meseci u toku 2004. i 2005. godine, kreirane su korelacione jednačine za potrošnju električne energije (aktivne i reaktivne), kao i vršne i prosečne angažovane snage u ukupnom mesečnom iznosu po jedinici mase proizvedenog gasovitog kiseonika. S druge strane, energetska i eksertska efikasnost procesa separacije vazduha na komponente u Fabrici kiseonika u Boru prikazane su kao odnos uložene i korisne energije, odnosno eksnergije, procesa.

Princip proizvodnje tehničkih gasova je primena protivstrujnog reversnog razmenjivača toplove, korišćenjem prigušnog (Joule–Thomson-ovog) efekta realnih gasova i ekspanzije dela vazduha, gde se vazduh utečnjava i, usled razlike u temperaturi tačke ključanja komponenti atmosferskog vazduha, vrši njegova rektifikacija na kiseonik i azot (ali i argon, ksenon, kripton i druge plemenite gasove) [1–3].

Za potrebe intenzifikacije tehnološkog procesa topljenja šarže u proizvodnji bakra u Rudarsko-topioničarskom basenu, Bor Grupa (RTB-Bor), izgrađena je i puštena u pogon fabrika za proizvodnju tehničkog kiseonika 1978. godine. Kapacitet fabrike je 100 t/dan gasovitog kiseonika čistoće 95 vol%, 10 t/dan tečnog kiseonika čistoće 99,5 vol%, 8,7 t/dan tečnog azota čistoće 99,999 vol% i 60 m^3_N/h gasovitog azota čistoće 99,999 %vol.

Tehnološka šema procesa razdvajanja vazduha u Fabrici kiseonika u Boru data je na slici 1. Atmosferski vazduh za razdvajanje usisava se četvorostepenim centrifugalnim kompresorom (I), slika 1 [1]. Otprašivanje vazduha se vrši pre komprimovanja u kombinovanom mokrom filteru. U kompresoru se vazduh komprimuje do pritiska 6,2 bar. Vazduh se nakon komprimovanja hlađi vodom (II) do 25 °C i uvodi u reverzni razmenjivač toplove (III) gde se hlađi isparavanjem otpadnog azota i proizvedenim gasovitim kiseonikom. Hlađenjem vazduha u razmenjivaču izdvaja se vlaga i ugljen-dioksid na unutrašnjim zidovima kanala kao inje i suvi led. Vazduh i otpadni azot naizmenično prolaze kroz kanale (na 4–5 min) tako da sa otpadnim azotom izlaze voda i ugljen-dioksid. Ohlađeni vazduh ulazi u donji deo donje

rektifikacione kolone (VII). U donjoj rektifikacionoj koloni izdvajaju se gasoviti i tečan azot. Gasoviti i tečni kiseonik izdvajaju se u gornjoj rektifikacionoj koloni (VI). S obzirom na to da je radna temperatura hladnog bloka postrojenja za razdvajanje vazduha veoma niska (u pojedinim delovima i niža od –190 °C), on se nalazi u kutiji koja je termički izolovana perlitolom i staklenom vunom, da bi gubici rashladne energije bili što niži.

Tehnološko iskorišćenje kiseonika, koji se nalazi u ulaznom atmosferskom vazduhu, u Fabrici kiseonika u Boru iznosi:

– projektovano: 76,30% ($0,1599 \frac{m^3_N}{m^3} O_2 / m^3$ vazduha) za operaciju I, 63,57% ($0,1332 \frac{m^3_N}{m^3} O_2 / m^3$ vazduha) za operaciju II i 70,24% ($0,1471 \frac{m^3_N}{m^3} O_2 / m^3$ vazduha) za operaciju III;

– ostvareno: 47,73–88,30% ($0,10–0,185 \frac{m^3_N}{m^3} O_2 / m^3$ vazduha) [1].

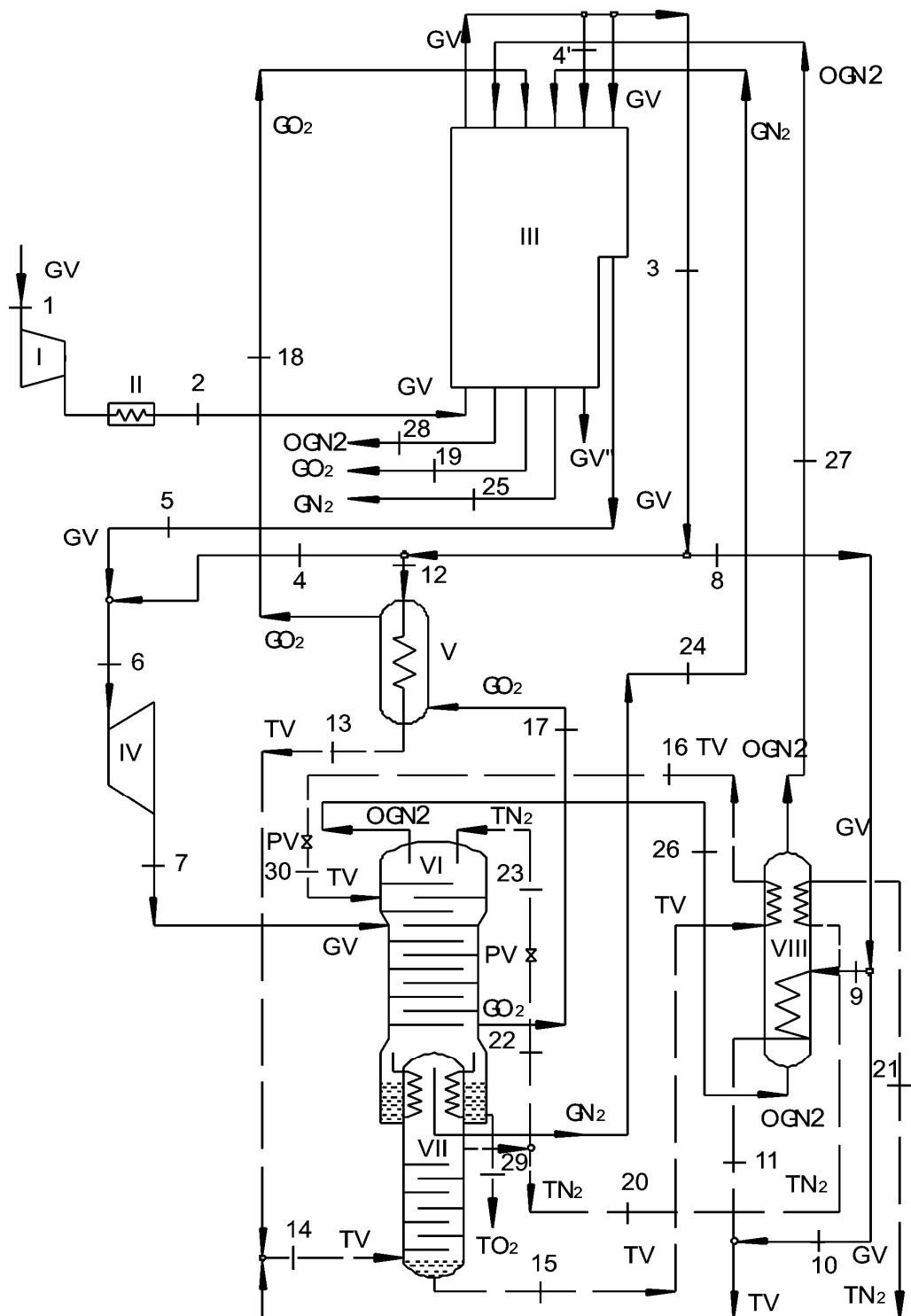
Kiseonik u gasovitom agregatnom stanju koristi se za intenzifikaciju procesa koji se odvija u plamenim pećima, a azot u gasovitom agregatnom stanju u preradi bakra u neutralnoj atmosferi. Obogaćivanjem vazduha za sagorevanje goriva u plamenim pećima smanjena je potrošnja uglja u plamenoj peći broj 1 za 16,24% i mazuta u plamenoj peći broj 2 za 17,90%. Korišćenjem „tehnološkog“ kiseonika u Topionici bakra u Boru povećana je relativna proizvodnja plamenih peći za 16–17% (3–4 t suvog koncentrata za svaku tonu uvedenog kiseonika) i smanjena je specifična potrošnja ekvivalentnog uglja za 440–540 kg/t utrošenog kiseonika. U procesu sagorevanja goriva u vazduhu obogaćenom kiseonikom postiže se smanjenje količine gasovitih produkata, gubitka toplove u okolinu i prenosa toplove konvekcijom, a uvećava se brzina sagorevanja goriva, temperatura sagorevanja, prenos toplove zračenjem, sadržaj sumpor-dioksida u gasovitim produktima i kapacitet prerađe šarže.

Autor za prepisku: M. Mitovski, RTB- Bor, Đorda Vajferta 20, 19210 Bor.

E-pošta: tirenergetika@ptt.yu

Rad primljen: 2. jul 2009.

Rad prihvaćen: 14. oktobar 2009.



Slika 1. Tehnološka šema procesa razdvajanja vazduha na komponente u Fabriki kiseonika u Boru. I – turbokompresor za vazduh, II – hladnjak vazduha, III – reverzni rekuperativni razmenjivač topline, IV – ekspanzionna gasna turbina, V – drugostepeni razmenjivač, VI – gornja (niskopritisna) rektifikaciona kolona, VII – donja (visokopritisna) rektifikaciona kolona, VIII – prvostepeni utečnjivač vazduha, PV – prigušni ventil, GV – gaseoviti vazduh, GO_2 – gaseoviti kiseonik, GN_2 – gaseoviti azot, OGN_2 – otpadni gaseoviti azot, TO_2 – tečni kiseonik, TN_2 – tečni azot.

Figure 1. Technological chart of the air separation process in Oxygen plant in Bor. I – air turbocompressor, II – air cooled heat exchanger (air cooler), III – reversible recuperative heat exchanger, IV – expansion gas turbine, V – secondary exchanger, VI – upper (low-pressured) fractionating column, VII – lower (high-pressured) fractionating column, VIII – foreground air liquefier, PV – suppressive valve, GV – gaseous air, GO_2 – gaseous oxygen, GN_2 – gaseous nitrogen, OGN_2 – gaseous nitrogen waste, TO_2 – liquid oxygen, TN_2 – liquid nitrogen.

Poštujući pomenute postavke i parametre fluida, određeni su kriterijumi za energetsku ocenu rada Fabrike kiseonika u Boru: energetski i eksersetski stepen korisnosti (dobrote) i specifična potrošnja električne energije [1].

Eksersetski stepen korisnosti postrojenja određen je za sledeće projektne parametre: temperatura atmosferskog vazduha: 20 °C, apsolutni atmosferski pritisak: 1,013 bar i relativna vlažnost atmosferskog vazduha: 70%, a za ostvarene uslove parametri vazduha su mereni za svaki razmatrani slučaj.

Analiza ostvarenih rezultata rada postrojenja kod promene količine tretiranog vazduha u opsegu od 14000 do 21000 m³/h, uvezši u obzir i rad kompresora za komprimovanje proizvedenog kiseonika, pokazala je da je specifična potrošnja energije, $E = 0,106 - 0,126 \text{ kWh po m}_N^3 \text{ ulaznog vazduha}$, odnosno $E = 0,660 - 0,957 \text{ kWh po m}_N^3 \text{ proizvedenog gasovitog kiseonika}$. Energetski stepen korisnosti i eksersetski stepen korisnosti su u opsegu 0,0872–0,1179, odnosno 0,0537–0,1247, redom. Na slici 2 prikazane su promene ostvarene vrednosti: specifične potrošnje energije, E , energetskog, η , i eksersetskog, v , stepena korisnosti postrojenja za razdvajanje vazduha u Fabrici tehničkog kiseonika u Boru u zavisnosti od promene protoka proizvedenog gasovitog kiseonika pre komprimovanja [1].

POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI SEPARACIJI KOMPONENTI VAZDUHA

Za odvijanje procesa kriogenog razdvajanja (separacije) komponenti vazduha, električna energija učestvuje sa više od 65% u troškovima; ona je takođe glavni emergent, svedena na ekvivalentni ugalj. Za posmatrani period rada Fabrike kiseonika u Boru od dvadeset meseci u toku 2004. i 2005. godine urađena je korelaciona zavisnost potrošnje aktivne i reaktivne električne energije, vršne i prosečne snage i mesečne proizvodnje gasovitog kiseonika (jednačine (1) do (12) i slike 3 i 4).

Korelace jednačine (1)–(6) za utrošenu električnu energiju (aktivnu E_a – viša tarifa, E_{avt} , i niža tarifa, E_{ant} , i reaktivnu E_r) i ostvarenu snagu (srednja, N_{sr} , i vršna, $N_{vršna}$) za mesečnu proizvodnju gasovitog kiseonika, m_{GO_2} (t/mesec), u Fabrici kiseonika prikazane su na slici 3.

$$E_a = E_{avt} + E_{ant} = 0,116m_{GO_2} + 973,98; R^2 = 0,2716 \quad (1)$$

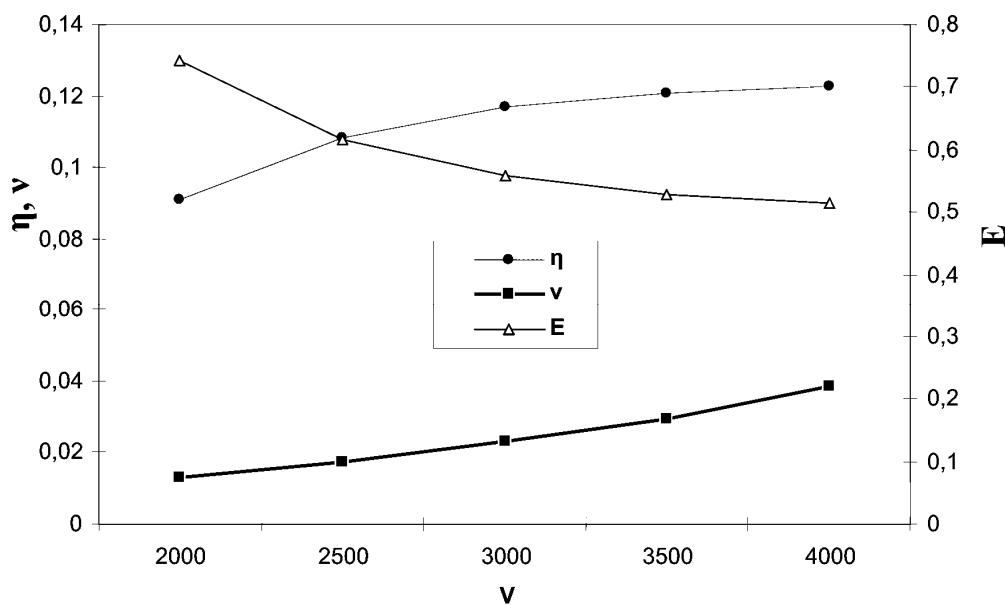
$$E_{avt} = 0,0814m_{GO_2} + 637,62; R^2 = 0,2903 \quad (2)$$

$$E_{ant} = 0,0346m_{GO_2} + 336,36; R^2 = 0,1897 \quad (3)$$

$$E_r = 0,0725m_{GO_2} + 652,16; R^2 = 0,2633 \quad (4)$$

$$N_{sr} = 0,0965m_{GO_2} + 1525,1; R^2 = 0,2108 \quad (5)$$

$$N_{vršna} = 0,1704m_{GO_2} + 1458,8; R^2 = 0,2264 \quad (6)$$



Slika 2. Zavisnost specifične potrošnje električne energije, E (kWh/m³ GO₂), energetskog, η , i eksersetskog, v , stepena korisnosti postrojenja za razdvajanje vazduha od protoka proizvedenog gasovitog kiseonika, V (m³ GO₂/h).

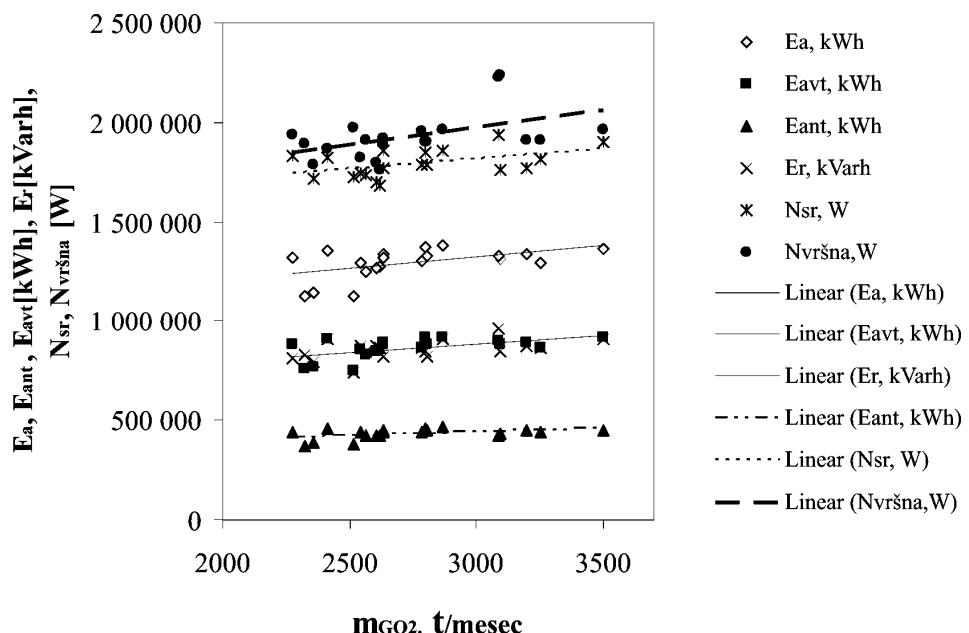
Figure 2. Dependence of the specific electrical energy, E (kWh/m³ GO₂), energy plant efficiency, η , and exergy plant efficiency, v , on the gaseous oxygen throughput, V (m³ GO₂/h).

$$E = 0,314456 + 842,194124/V_{GO_2}, r = 0,9278782$$

$$\eta = 0,1514911 - 99,1733979/V_{GO_2}, r = 0,8250412$$

$$v = 0,25837 - 2719,85252/V_{vazduha} - 0,00003 V_{GO_2},$$

$$r = 0,8588487$$



Slika 3. Zavisnosti potrošnje aktivne električne energije, E_a , aktivne električne energije više tarife, E_{avt} , aktivne električne energije niže tarife, E_{ant} , reaktivne električne energije, E_r , srednje snage, N_{sr} , i vršne snage, $N_{vršna}$ od mesečne proizvodnje gasovitog kiseonika u Fabrici tehničkog kiseonika u Boru (m_{GO_2}). Faktor snage u Fabrici kiseonika je konstantan i ostvaren je u iznosu od $\cos\phi = 0,85$.

Figure 3. Active power consumption, E_a , higher rate active electric energy, E_{avt} , lower rate active electrical energy, E_{ant} , reactive electric energy, E_r , average power, N_{sr} , and calculated power, $N_{vršna}$, versus monthly production of gaseous oxygen in Oxygen plant in Bor (m_{GO_2}). Power factor is constant and attained value is $\cos\phi = 0,85$.

Korelacione jednačine (7) do (12) za specifičnu utrošenu električnu energiju i ostvarenu specifičnu snagu za mesečnu proizvodnju gasovitog kiseonika u Fabrici kiseonika, m_{GO_2} (t/mesec), prikazane su na slici 4.

$$e_a = e_{avt} + e_{ant} = 154,74 m_{GO_2}^{-0,732}; R^2 = 0,73532 \quad (7)$$

$$e_{avt} = 93,394 m_{GO_2}^{-0,7194}; R^2 = 0,7388 \quad (8)$$

$$e_{ant} = 62,152 m_{GO_2}^{-0,7554}; R^2 = 0,7123 \quad (9)$$

$$e_r = 127,83 m_{GO_2}^{-0,7605}; R^2 = 0,7799 \quad (10)$$

$$n_{sr} = 396,52 m_{GO_2}^{-0,81}; R^2 = 0,8733 \quad (11)$$

$$n_{vršna} = 282,66 m_{GO_2}^{-0,7576}; R^2 = 0,7416 \quad (12)$$

RASPODELA ENERGIJE PO PROIZVODIMA KRIOGENOG PROCESA

Kod kriogenih procesa razdvajanja komponenti vazduha uglavnom se dobija više proizvoda, a ređe samo jedan. U najvećem broju slučajeva dobija se više proizvoda, kako u gasovitom tako i u tečnom agregatnom stanju. U svim tim slučajevima postavlja se pitanje raspodela potrošnje energije i troškova proizvodnje po pojedinim proizvodima. Kada se koristi jedan proizvod procesa razdvajanja (kiseonik ili azot), a drugi se proizvodi ne koriste, proračun se svodi samo na jedan proizvod. Ako se istovremeno koriste više proizvoda specifična potrošnja energetika i troškovi proizvodnje po pro-

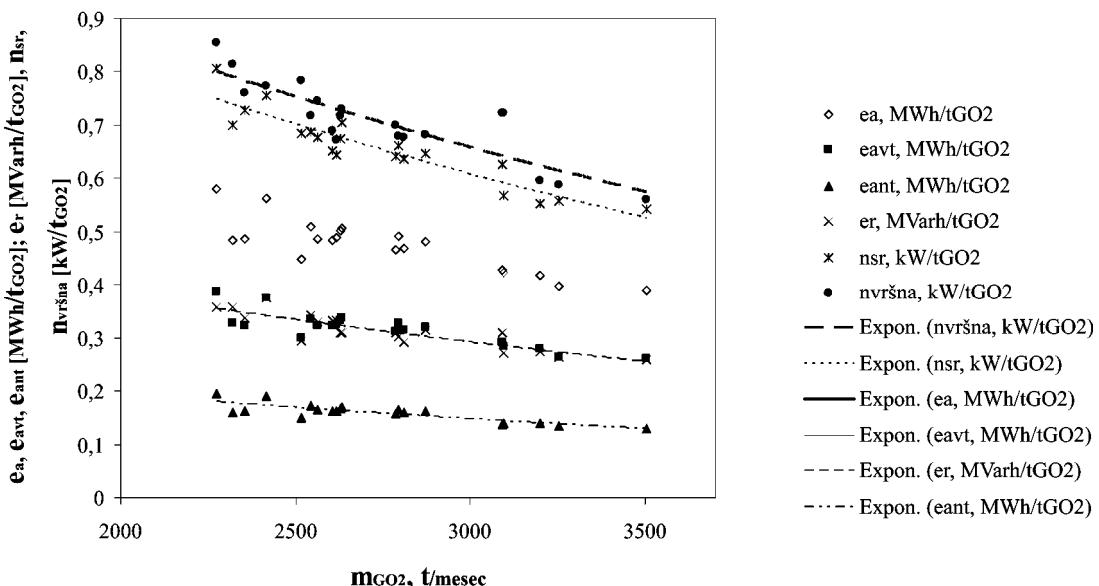
duktilima razdvajanja mogu se raspodeliti na složeniji način.

Potrošnja energetika i proizvodni troškovi pri kompleksnom razdvajaju vazduha mogu se svrstati u dve grupe:

1. Potrošnja koja se javlja kao opšta kod svih (ili nekoliko) proizvoda. Pri tome, analiza tehnološkog procesa ne daje neposrednu raspodelu potrošnje po proizvodima. Tako se energija potrebna za komprimovanje vazduha, neophodna za razdvajanje komponenata vazduha, troši na kompletno postrojenje.

2. U drugu grupu mogu se uključiti potrošnja energetika i troškovi proizvodnje proizvoda koji se dobijaju u pojedinim stadijumima tehnološkog procesa vezani za dodatnu obradu pojedinih proizvoda ili poluproizvoda. Kao primer, navodi se hemijsko prečišćavanje sirovog argona ili kriptona od kiseonika, komprimovanje kiseonika, azota ili drugih proizvoda razdvajanja u kompresorima, transport u pumpama i slično.

Kod određivanja ukupne potrošnje energetika i troškova proizvodnje druge grupe, proračun i raspodela ne predstavljaju posebnu poteškoću. Osnovna poteškoća povezana je sa raspodelom potrošnje energetika po proizvodima. Ovaj problem je okarakterisan tačnom veličinom zbirne potrošnje, a složen je prema raspodeli po proizvodima. Kod razdvajanja vazduha, na primer, na proizvode kiseonik, azot, argon i nečist (otpadni) azot, nužna je raspodela potrošnje energije na prva tri proizvoda.



Slika 4. Zavisnosti specifične potrošnje aktivne električne energije, e_a , aktivne električne energije više tarife, e_{avt} , aktivne električne energije niže tarife, e_{ant} , reaktivne električne energije, e_r , srednje, n_{ssr} , i vršne snage, n_{vrsna} , od mesečne proizvodnje gasovitog kiseonika u Fabriči tehničkog kiseonika u Boru, m_{GO_2} .

Figure 4. Specific active power consumption, e_a , higher rate active electric energy, e_{avt} , lower rate active electrical energy, e_{ant} , reactive electric energy, e_r , average power, n_{ssr} , and calculated power, n_{vrsna} , versus monthly production of gaseous oxygen in Oxygen plant in Bor, m_{GO_2} .

Iz niza mogućnosti vezanih za raspodelu potrošnje energije i troškova proizvodnje po proizvodima razdvajanja vazduha navode se dva [4,5]:

1. Metod "isključivanja", kada se od više proizvoda bira jedan kao osnovni (praksa je da to bude gasoviti kiseonik), a ostali produkti se razmatraju kao sporedni. Troškovi sporednih produkata – inertnih gasova i azota (po ceni realizacije) oduzima se iz opštih troškova, tj. isključuju se. Ostatak troškova predstavljaju cenu osnovnog proizvoda (na primer, kiseonika). Korišćenje ovog metoda dovodi do toga da se kompleksna proizvodnja odnosi na osnovni proizvod, tj. kiseonik. Zbog visoke cene inertnih gasova, cena kiseonika, kod ovakvog metoda proračuna, veštački se snižava što ne odgovara stvarnim troškovima njegove proizvodnje ili potrošnje energeta. Pri tome, nije isključeno da izostavljeni troškovi mogu dostići vrednost jednaku ili čak veću od troškova proizvodnje osnovnih proizvoda. Tada osnovni proizvod (kiseonik) može imati cenu nula ili negativnu. Zbog toga, ovaj se metod ne preporučuje kod proračuna cene energeta.

2. Energetski metod, gde se raspodela troškova vrši po proizvodima na osnovu izlaznih energetskih karakteristika produkata razdvajanja vazduha, obuhvata njihovu ekserviju, jer je ona proporcionalna minimalnom tehničkom radu izdvajanja pojedinih proizvoda iz vazduha. Ona je jednoznačno povezana sa sastavom (čistoćom) produkata, njihovim pritiskom, temperaturom i agregatnim stanjem, i njena vrednost je utoliko veća ako je veća potrošnja energije kod izdvajanja proizvoda. Kod

energetskog metoda raspodele, svi opšti troškovi, kao prvo, energetski, a posle i ostali, raspodeljuju se po proizvodima razdvajanja proporcionalno njihovim specifičnim ekservijama na izlazu iz postrojenja (ili kontrolne granice) [3,4].

Deo opštih troškova, koji se odnose na određeni (i -ti) proizvod razdvajanja, koeficijent raspodele, b_i , određuje se jednačinom:

$$b_i = k_i e_{xi} m_i / \sum k_i e_{xi} m_i \quad (13)$$

gde je e_{xi} (kJ/kg) specifična ekservija razdvajanja i -tog proizvoda na izlazu iz postrojenja, m_i (kg/h ili t/a) količina proizvedenog produkta, a k_i koeficijent koji uzima u obzir razlike u stepenu korisnosti procesa razdvajanja, komprimovanja i utečnjavanja. Za proizvode koji napuštaju postrojenje za razdvajanje kao komprimovani $k_i = 0,45$, a za proizvode koji izlaze iz postrojenja u gasovitom agregatnom stanju pod atmosferskom pritisku $k_i = 1,0$ [3,6].

Za proračun količine potrošene energije, E_{ni} , za određeni proizvod neophodno je pomnožiti koeficijentom raspodele, b_i , zbirni iznos potrošnje energije bloka, ΣE_{ni} , umanjen za energiju dobijenu od ekspanzije vazduha, ukoliko se ona koristi. Specifična potrošnja energije tada je $e_{ni} = E_{ni} / m_i$ (kWh/kg).

Ocena proizvodnosti postrojenja za razdvajanje atmosferskog vazduha namenjenog za istovremenu proizvodnju različitih proizvoda, može biti prikazana po jednom proizvodu, najčešće kiseoniku. Količina drugih proizvoda i potrošnja energije za njihovo izdvajanje

upoređuju se sa tim veličinama za kiseonik. Pored toga, kiseonik se javlja u različitim agregatnim stanjima (gasovito ili tečno) na različitim pritiscima i u različitim količinama. Zbog toga je potrebno da se iznade takav pokazatelj proizvodnosti koji će uzimati u obzir količine i kvalitet koji su karakteristični za sve proizvode razdvajanja vazduha u posmatranom postrojenju. U tu svrhu, može se uzeti prividna (relativna) proizvodnost, koja će biti svedena, iz praktičnih razloga, na jedan proizvod – kiseonik. Tada je prividna (relativna) proizvodnost postrojenja po uslovnom gasu, na primer kiseoniku, $m_{\text{GO}_2}^{\text{pr}} = (\sum m_i e_{xi}) / e_{x,\text{GO}_2}$. Ovakvo izražavanje proizvodnosti ima veoma važno značenje za određivanje specifične potrošnje energenata, materijala i drugih veličina. Ovaj način izražavanja može se koristiti kod planiranja i upoređivanja različitih postrojenja, mašina i potrošnje energenata, materijala i troškova proizvodnje.

Za projektovanu proizvodnju Fabrike kiseonika u Boru prividna (relativna) proizvodnja svedena na gasoviti kiseonik, $m_{\text{GO}_2}^{\text{pr}}$ (kg/h), je:

– za operaciju I: (3500 m³/h GO₂ i 60 m³/h GN₂):

$$m_{\text{GO}_2}^{\text{pr}} = \frac{3500 \times 1,4289 \times 103,293 + 60 \times 1,25046 \times 164,448}{103,293} = 5121 \text{ kg/h};$$

– za operaciju II (2916 m³/h GO₂, 60 m³/h GN₂ i 290 m³/h (8,7 t/dan) TN₂):

$$m_{\text{GO}_2}^{\text{pr}} = 5853 \text{ kg/h};$$

– za operaciju III (2.916 m³/h GO₂, 60 m³/h GN₂ i 292 m³/h (10 t/dan) TO₂):

$$m_{\text{GO}_2}^{\text{pr}} = 7146 \text{ kg/h}.$$

Raspodela električne energije u procesu razdvajanja vazduha u Fabrici izvršena je na osnovu minimalnog rada razdvajanja vazduha (eksergije razdvajanja). Na osnovu praćenja proizvodnje kiseonika u toku 2007. godine urađena je raspodela potrošnje električne energije po proizvodima i prikazana je u tabeli 1. Od ukupne potrošnje električne energije u procesu, 82,59% energije je utrošeno na izdvajanje gasovitog kiseonika, 14,04% za tečni kiseonik, 1,98% za tečni azot i 1,39% za gasoviti azot.

Tabela 1. Parametri proizvoda procesa razdvajanja vazduha na komponente

Table 1. Product parameters for air separation process into the components

Proizvod razdvajanja atmosferskog vazduha, x_i	Proizvedena količina m_{xi} , t	Pritisak bar	Temperatura proizvoda °C	Specifična eksergija [7] e_{xi} , kJ/kg	Koeficijent raspodele $100b_{xi}$, %	Potrošnja električne energije E_{xi} , kWh	Ukupna specifična potrošnja električne energije kWh/ x_i
GO ₂	27547,0	1,114	20	103,293	82,59	11840043	429,812
TO ₂	1519,0	1,114	-180	707,932	14,04	2012764	1325,059
GN ₂	644,0	5,190	20	164,448	1,39	199269	309,424
TN ₂	342,5	5,190	-190	443,200	1,98	283852	828,765
Ukupno	30052,5	–	–	139,039	100,00	14335928	477,029

Specifična potrošnja električne energije u 2007. godini po proizvodima kriogene rektifikacije, na osnovu merenja iznosi: 524,542 kWh/t gasovitog kiseonika pre njegovog komprimovanja (gasoviti kiseonik u avgustu i decembru je komprimovan dodatno, kada je klipni kompresor radio u tom periodu i potrošio je 18700 kWh električne energije). Vremensko iskorisćenje Fabrike kiseonika iznosi 86,98%. U 2007. godini, Fabrika kiseonika je proizvela: 27547 t_{GO₂}, 1519 t_{TO₂}, 644 t_{GN₂} i 342,5 t_{TN₂}. U Topionici bakra je utrošeno 17665 t_{GO₂} (ili 64,13% proizvedene količine GO₂). Prodaja proizvoda Fabrike je ostvarena u količini od: 1228,47 t_{TO₂}, 280,87 t_{GN₂} i 231,49 t_{TN₂} [7,8].

Od ukupno proizvedene količine gasovitog kiseonika u Fabrici kiseonika, 64,13% utrošeno je u plamenoj peći, a ostala količina je ispuštena u atmosferu. Na ovaj način, Fabrika kiseonik je radila sa skoro 35,87% većim kapacitetom od potrebnog, pa je i povećana potrošnja električne energije skoro za 4,247 GWh, što je ekvivalentno ceni od 176.953,84 €.

Potrošnja električne energije u Fabrici kiseonika na osnovu izveštaja Kontrolnog centra RTB-Bor Grupe iznosi: aktivna, 14335928 kWh (aktivna viša tarifa 9913062 kWh, aktivna niža tarifa 4422866 kWh), reaktivna, 9590394 kW_h, mesečno vršno opterećenje u proseku je 2252 kW, $\cos\phi = 0,84$ i $p_{\text{max}}/p_{\text{sr}} = 1,377$. Električnu energiju su utrošili: kompresor za komprimovanje vazduha, 92,85%, kompresor za komprimovanje kiseonika, 0,13% i ostala oprema 7,02%.

RASPODELA TROŠKOVA RAZDVAYANJA VAZDUHA NA PROIZVODE

Ostvareni iznos troškova u radu Fabrike kiseonika u Boru je uzet u poslovnoj 2007. godini, dok su koeficijenti raspodele, izračunati na osnovu jednačine (13), uzeti iz tabele 1. Troškove proizvodnje čine: troškovi energenata, C_i^{en} , plata radnika, C_i^{pl} , amortizacije postrojenja, C_i^{a} , troškovi na teret preduzeća, C_i^{tp} , i troškovi održavanja, C_i^{od} . S obzirom da se svi proizvodi ne tretiraju na isti način, troškovi se dele u dve grupe. Prva grupa obuhvata troškove zajedničke za sve proizvode, a druga dopunske troškove (troškove za dopunsko komprimovanje, utečnjavanje, skladištenje i slično).

Raspodela troškova proizvodnje proizvoda razdvajanja vazduha, na osnovu energetskog metoda, određena je prema jednačini [4]:

$$C_i = \Sigma T_i b_i / m_i + \Sigma T_i^d \quad (14)$$

gde je T_i (din) i -ti trošak proizvodnje, a T_i^d (din) trošak za dopunsko tretiranje i -tog proizvoda.

Ostvarena prosečna cena električne energije po svim osnovama svedena na aktivnu energiju u tom periodu, na nivou trafo-stanice TS-II u Boru, odakle se i Fabrika kiseonika snabdeva potrebnom električnom energijom, je $c_{el} = 3,2938$ din/kWh.

Potrošnja vodene pare (pritiska 10 bar i temperature 180–200 °C), za sušenje vazduha i regeneraciju adsorbera, iznosi 6813 t. Cena pare je $c_p = 575$ din/t. Kondenzat pare se ispušta u tok otpadne vode, a njegova cena je uzeta da je jednaka ceni demineralizovane vode, $c_k = 105$ din/m³.

Za potrebe hlađenja vazduha, kiseonika i ulja utrošeno je 344531 m³ vode na curenju, isparavanju i drugo. U cirkulaciji je stalno oko 424 m³/h rashladne vode. Cena vode je $c_w = 8,50$ din/m³.

Ostvareni troškovi proizvodnje tehničkih gasova u Fabrici kiseonika u Boru 2007. godine iznose:

1. Električna energija: 14335928 kWh × 3,3389 din/kWh = 47.738.640,24 din.
2. Para: 6813 t × 575 din/t = 3.917.475,00 din.
3. Plate zaposlenih: 12 meseci × 25 radnika × 39.100 din = 11.730.000,00 dinara.
4. Održavanje opreme: 4.500.000,00 din.
5. Rashladna voda (gubitak): 344.531 m³ × 8,5 din/m³ = 2.928.513,50 din.
6. Pijača voda: 5.992 m³ × 48,39 din/m³ = 289.952,88 din.
7. Amortizacija: 1.000.000,00 din.
8. DEM voda: 6.813 m³ × 105 din/m³ = 15.365 din.

$$\sum_{i=1}^8 x_i = 72.819.946,62 \text{ din.}$$

Specifični troškovi za utrošenu električnu energiju, vodenu paru, kondenzat pare i rashladnu vodu mogu da se odrede iz jednačine:

$$C_i^{en} = (E_{el}c_{el} + P c_p + K c_k + W c_w)b_i / m_i \quad (15)$$

gde su E_{el} (kWh), P (t), K (m³) i W (m³) potrošnja električne energije, vodene pare, kondenzata pare i rashladne vode, redom u posmatranom periodu, a c_{el} (din/kWh), c_p (din/t), c_k (din/m³) i c_w (din/m³) cena električne energije, vodene pare, kondenzata pare i rashladne vode, redom.

Učešće troškova u proizvodnoj ceni produkata razdvajanja atmosferskog vazduha na izlazu iz kontrolne granice hladnog bloka je: električna energija 65,56%, para za zagrevanje 6,36%, plata zaposlenih 16,12%, održavanje opreme 6,18%, amortizacija 1,37% i rashladna voda 4,41%. Troškovi proizvodnje tehničkih gasova proizvedenih u Fabrici kiseonika u Boru u 2007. godini, iznose (tabela 2): za gasoviti kiseonik, 2.183,25 din/t_{GO₂}, za tečan kiseonik, 6.730,69 din/t_{TO₂}, za gasoviti azot, 1.571,73 din/t_{GN₂} i za tečan azot, 4.209,74 din/t_{TN₂}.

ZAKLJUČCI

Proizvodnja tehničkih gasova u Fabrici kiseonika u Boru odvija se po niskopritisnom kriogenom postupku, gde se vazduh nakon otprašivanja, hlađenja, delimičnog utečnjavanja i rektifikacije razdvaja na kiseonik i azot u tečnom i gasovitom agregatnom stanju. Gasoviti kiseonik ima osnovnu primenu u intenzifikaciji tehnološkog procesa u metalurgiji bakra, gasoviti azot u pogonima prerade bakra, a tečni kiseonik i azot za internu i eksternu primenu.

Intenzifikacijom pirometalurškog procesatopljenja prženca gasovitim kiseonikom smanjena je potrošnja ekvivalentnog uglja za 440–540 kg po toni utrošenog kiseonika, povećan je sadržaj sumpor-dioksida u gasovitim proizvodima, smanjena je njihova količina i potrošnja električne energije za njihov transport.

Raspodela utrošene energije i troškova proizvodnje kriogene separacije vazduha u Fabrici kiseonika u Boru na komponente je sledeća: gasoviti kiseonik, 82,59%, tečni kiseonik, 14,04%, gasoviti azot, 1,39% i tečni azot, 1,98%. S druge strane, potrošnja električne energije, svedena na jedinicu mase proizvoda u 2007. godini iznosi: 1325,059 kWh/t tečnog kiseonika, 828,765 kWh/t tečnog azota, 429,812 kWh/t gasovitog kiseonika i 309,424 kWh/t gasovitog azota. Ostvareni troškovi u

Tabela 2. Troškovi proizvodnje u Fabrici kiseonika
Table 2. Oxygen plant production costs

Proizvod (x_i)	Količina proizvoda (m_{xi}), t	Koeficijent raspodele ($100b_{xi}$), %	Troškovi proizvodnje, din	Specifični troškovi proizvodnje, din/t _{xi}
GO ₂	27547,0	82,59	60.141.993,91	2.183,25
TO ₂	1519,0	14,04	10.223.920,51	6.730,69
GN ₂	644,0	1,39	1.012.197,26	1.571,73
TN ₂	342,5	1,98	1.441.834,94	4.209,74
Ukupno	30052,5	100,00	72.819.946,62	2.423,09

proizvodnji tehničkih gasova na pragu Fabrike u istoj godini imaju vrednosti: 6.730,69 din/t tečnog kiseonika, 4.209,74 din/t tečnog azota, 2.183,25 din/t gasovitog kiseonika i 1.571,73 din/t gasovitog azota.

Proces kriogene separacije komponenti vazduha, koji se odvija u Fabrici kiseonika u Boru, karakterističan je po visokoj proizvodnosti (u odnosu na projekovanu), vremenskom iskorišćenju i veoma niskom stepenu energetske efikasnosti (u odnosu na neke tehničke sisteme); energetski iznosi 0,0872–0,1179, a eksersetski 0,0537–0,1247.

Poboljšanje energetske efikasnosti navedenog procesa i sistema u celini može se ostvariti utečnjavanjem gasovitog kiseonika, koji se kao višak ispušta u atmosferu, korišćenjem otpadnog azota umesto instrumentalnog vazduha u pogonima RTB-Bor, a nakon dodatnog komprimovanja, i korišćenje otpadnog azota u procesu prženja koncentrata bakra za regulaciju temperature procesa umesto rashladne vode, i korišćenje energije ekspanzije vazduha u gasnim turbinama za proizvodnju električne energije. Realizacijom predloženih mera ostvarila bi se racionalnija potrošnja proizvoda i podigla bi se energetska i finansijska efikasnost proizvodnje tehničkih gasova.

LITERATURA

- [1] M. Mitovski, Energetska efikasnost kriogenog procesa, ŠIP "Bakar", Bor, 1994, str. 132.
- [2] G. Kachaniwsky (Ed.), The Impact of Oxygen on the Productivity of Non-Ferrous Metallurgical Processes, Pergamon Press, New York, 1987, p. 300.
- [3] В.М. Бродянский, Ф.И. Meerzon, Производство кислорода, Металлургия, Москва 1970, str. 284.
- [4] M. Mitovski, Tehnički gasovi – izbor postrojenja za razdvajanje vazduha, studija, RTB-Bor, Bor, 1998.
- [5] M. Mitovski, Potrošnja energije pri odvijanju kriogenog razdvajanja vazduha na komponente, KGH broj 2/1998, str. 69–73.
- [6] Д. Л. Глизманенко (ред.), Кислород, справочник, часть I, Металлургия, Москва, 1967.
- [7] М. Митовски, Енергетска ефикасност погона ТИР-а у 2007. години, РТБ-Бор, 2008.
- [8] M. Mitovski, Energy Efficiency of the Air Separation Cryogenic Process, The Fifth Cryogenics '98, Prague, 1998.
- [9] В.А. Грегорь, Ю.И. Крохун, Тепло и массообменные аппараты криогенной техники, Москва, Энергоиздат, 1982.

SUMMARY

EFFICIENCY OF THE PROCESS OF CRYOGENIC AIR SEPARATION INTO THE COMPONENTS

Milanče M. Mitovski¹, Aleksandra M. Mitovski²

¹Copper Mining and Smelting Complex Bor, Bor, Serbia,

²University of Belgrade, Technical faculty in Bor, Bor, Serbia

(Professional paper)

The separation process of atmospheric air into its components by means of cryogenic low-pressure procedure, which takes place in the Oxygen plant in the Copper Mining and Smelting Complex, yields various products of different quantities and purities. Proper assessment of the energy consumption, hence assignments production cost of individual products may present considerable problem. For that goal, the least invested technical operation was adopted as criteria, and was restrained for all costs of production and distribution of specific energy. Case study was carried out in the Oxygen factory by monitoring producing parameters for the process in the 2007 year. Based on the monitoring of production parameters and their costs for 20 months in the period 2004–2005, correlation equations for power consumption in the total monthly amount and per mass of produced gaseous oxygen were created. The energy and exergy efficiency of the air separation process into the components are expressed as the ratio of input and useful energy and exergy of the process. On the basis of the adopted criteria, the assignments of energy consumption and production costs for cryogenic air separation process into the components are as follows: 82.59% for gaseous oxygen, 14.04% for liquid oxygen, 1.39% for gaseous nitrogen and 1.98% for liquefied nitrogen. The air separation efficiency is achieved in the amount of energy 0.0872–0.1179 and exergy 0.0537–0.1247. Power consumption per mass of the products in 2007 year is 1325.059 kWh/t of liquid oxygen, 828.765 kWh/t of liquid nitrogen, 429.812 kWh/t of gaseous oxygen and 309.424 kWh/t of nitrogen gas. Production costs of the technical gases at the dawn of the factory are: 6730.69 RSD/t of liquid oxygen, 4209.74 RSD/t of liquid nitrogen, 2183.25 RSD/t of gaseous oxygen and 1571.73 RSD/t of gaseous nitrogen.

Ključne reči: Kriogeni proces • Vazduh • Kiseonik • Energija • Potrošnja • Troškovi

Key words: Cryogenic process • Air • Oxygen • Energy • Consumption • Costs