

**MATEMATSKI MODEL PROCESA SAGORIJEVANJA U PROCESU  
PROIZVODNJE CEMENTA**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE COMBUSTION PROCES IN  
CEMENT INDUSTRY**

**Izet Imamović, dipl.ing.tehnologije,  
DD FCL, Lukavac**

**Sead Čatić, dipl.ing.tehnologije,  
DD FCL, Lukavac**

**Mr. sci. Zehrudin Osmanović, viši  
asistent,  
JU Univerzitet u Tuzli, Tehnološki  
fakultet Tuzla**

**Dževad Omerdić, dipl.ing.tehnologije,  
DD FCL, Lukavac**

**Ključne riječi:** Cement, Sagorijevanje, Matematsko modeliranje

**REZIME**

*U radu je prezentiran matematski model sagorijevanja čvrstog (ugljena prašina), tečnog (mazut) i plinovitog goriva (koksni gas) uz obogaćivanje zraka tehničkim kiseonikom. Naglašena je osnovna karakteristika matematskog modela a to je multivarijantnost tj. mogućnost da se analizira veliki broj realnih skupove utvrđenih informacionih promjenjivih.*

*Interpretacijom modela (na računaru) moguće je za relativno kratko vrijeme, dobiti tehnološke parametre (računske promjenjive) egzistirajućih topoloških struktura procesa sagorijevanja u cementnoj industriji kao i alternativnih topoloških struktura.*

**Key words:** Cement, combustion, mathematical modelling

**SYMMARY**

*In that present work mathematical model of combustion of coal powder, coke gas and liquid fuel with addition of technical oxygen was represented.*

*Multivariate as a basic characteristic of the mathematical model was emphasised.*

*By interpretation of model (on computer) is possible to calculate technology parameters of real and alternative topological structure of the combustion process in cement industry in short time.*

**UVOD**

Ocjena rotacione peći, jednog od najvažnijih podsistema pri proizvodnji cementa, vrši se na osnovu proizvodnje klinkera, utroška topline i kvalitete proizvoda.

Izvedba loženja peći i upotrijebljena vrsta goriva znatno utiču na rad bilo kojeg sistema peći. U rotacionoj peći mogu se upotrijebiti sve vrste goriva čija temperatura plamena iznosi najmanje 1700°C i za koje je put izgaranja relativno kratak. Gorivo treba ravnomjerno

dozirati a njegove karakteristike kao što su: ogrijevna vrijednost, razdioba i veličina čestica, temperatura i hemijski sastav moraju biti što konstantniji.

Hemijski sastav goriva bitno utiče na rad peći jer od njega zavisi količina zraka potrebna za izgaranje i sposobnost zračenja [1]. Ako gorivo nije povoljno za određeni sistem peći, stvaraju se začepjenja ciklona, čiji nastali prstenovi u većini slučajeva uzrokuju i zaustavljanje peći [2]. Izgaranje goriva je hemijska reakcija između ugljenika i ugljovodonika u gorivu s kiseonikom iz zraka pri čemu su produkti izgaranja prvenstveno CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O [3]. U posljednje vrijeme, u cementnoj industriji, sve je više naglašena mogućnost zamjene tečnih (“skupih”) goriva krutim i gasovitim (“jeftinijim”) gorivima kao i upotreba alternativnih (otpadni materijali) goriva [4].

## 1. DEFINISANJE ZADATKA

Radi analize egzistirajućih i alternativnih topoloških struktura potrebno je formirati matematski model koji će zadovoljiti slijedeće uslove:

- da može prihvatiti n-tokova goriva bez obzira na njihovo agregatno stanje uz mogućnost upotrebe alternativnih goriva, (djelimična ili potpuna supstitucija)
- da omogući analizu i proračun tehnoloških parametara procesa sagorijevanja goriva zrakom (sa i bez predgrijavanja), sa i bez obogaćivanja kiseonikom.
- da je multivarijantan sa stanovišta izbora skupa utvđenih informacionih promjenjivih.
- da omogući analizu parametrara procesnog sistema u relativno kratkom roku.

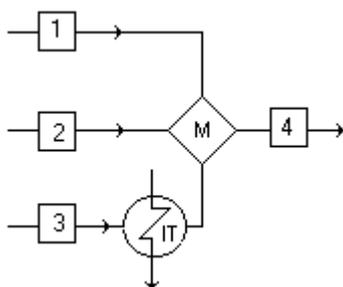
## 2. FORMIRANJE MATEMATSKOG MODELA

Korak 1: Formiranje procesne strukture, obilježavanje procesnih tokova i njihovih konstituenata

Na osnovu procesnog postupka sagorijevanja goriva u FC Lukavac [6], moguće je razviti strukturu procesnog flowsheeta, uz mogućnost dopune alternativnim tokovima ( tokovi gasovitog i čvrstog goriva i tok tehničkog kiseonika).

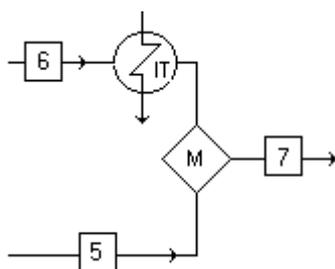
Tako realizirana procesna struktura sastoji se od 3 podsistema:

1) podsistem pripreme goriva :



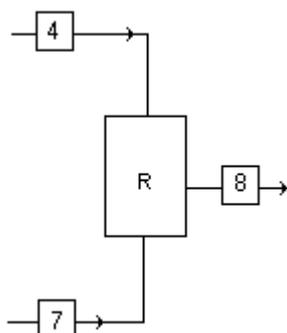
SLIKA 1 TOPOLOŠKA STRUKTURA PROCESNOG PODSISTEMA PRIPREME GORIVA  
1-TOK ČVRSTOG GORIVA (UGLJENA PRAŠINA), 2-TOK PAROVITOG GORIVA (KOKSNI GAS), 3-TOK TEČNOG GORIVA (MAZUT), 4-TOK SMJESE GORIVA, IT- PREDGRIJAČ TEČNOG GORIVA, M-MJEŠAČ.

2)Podsistem pripreme zraka



SLIKA 2 TOPOLOŠKA STRUKTURA PROCESNOG PODSISTEMA “OBOGAĆIVANJA “ZRAKA TEHNIČKIM KISEONIKOM 5-TOK KISEONIKA, 6-TOK ZRAKA, 7-TOK SMJESE “OBOGAĆENOG” ZRAKA, IT-IZMJENJIVAČ TOPLINE, M-MJEŠAČ ZRAKA I TEHNIČKOG KISEONIKA.

### 3) Podsystem sagorijevanja “miješanog” goriva u struji “obogaćenog” zraka



SLIKA 3 TOPOLOŠKA STRUKTURA PROCESNOG PODSISTEMA SAGORIJEVANJA “MIJEŠANOG” GORIVA U STRUJI “OBOGAĆENOG” ZRAKA 4-TOK SMJESE GORIVA, 7-TOK SMJESE “OBOGAĆENOG” ZRAKA, 8-TOK PLINOVA NAKON SAGORIJEVANJA, R-REAKTOR

#### Korak 2: Formiranje bilansnih jednačina procesne jedinice

U skladu sa procesnom šemom, usvojit će se slijedeće oznake:

$G_j$ -molski protok  $j$ -tog toka,  $j=1,8$ ; 1-tok čvrstog goriva (ugljena prašin), 2-tok parovitog goriva (koksni gas), 3-tok tečnog goriva (mazut), 4-tok smjese goriva, 5-tok kiseonika, 6-tok zraka, 7-tok smjese “obogaćenog” zraka, 8-tok plinova nakon sagorijevanja,  $c_i^{(j)}$ -sadržaj  $i$ -te komponente u  $j$ -tom toku:  $i=1,10$ , 1-C, 2-H<sub>2</sub>, 3-S, 4-N<sub>2</sub>, 5-O<sub>2</sub>, 6-H<sub>2</sub>O, 7-pepeo, 8-CO, 9-CO<sub>2</sub>, 10-SO<sub>2</sub>

Uz uslov da se sagorijevanje goriva se odvija po slijedećim reakcijama:



Formira se slijedeći sistem jednačina:

#### Podsystem pripreme goriva

Jednačine materijalnog bilansa:

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na ugljenik:

$$G_1 \cdot c_1^{(1)} + G_2 \cdot c_1^{(2)} + G_3 \cdot c_1^{(3)} = G_4 \cdot c_1^{(4)} \quad (1)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na vodonik:

$$G_1 \cdot c_2^{(1)} + G_2 \cdot c_2^{(2)} + G_3 \cdot c_2^{(3)} = G_4 \cdot c_2^{(4)} \quad (2)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na sumpor:

$$G_1 \cdot c_3^{(1)} + G_2 \cdot c_3^{(2)} + G_3 \cdot c_3^{(3)} = G_4 \cdot c_3^{(4)} \quad (3)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na azot:

$$G_1 \cdot c_4^{(1)} + G_2 \cdot c_4^{(2)} + G_3 \cdot c_4^{(3)} = G_4 \cdot c_4^{(4)} \quad (4)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na kiseonik:

$$G_1 \cdot c_5^{(1)} + G_2 \cdot c_5^{(2)} + G_3 \cdot c_5^{(3)} = G_4 \cdot c_5^{(4)} \quad (5)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na vodu:

$$G_1 \cdot c_6^{(1)} + G_2 \cdot c_6^{(2)} + G_3 \cdot c_6^{(3)} = G_4 \cdot c_6^{(4)} \quad (6)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na pepeo:

$$G_1 \cdot c_7^{(1)} + G_2 \cdot c_7^{(2)} + G_3 \cdot c_7^{(3)} = G_4 \cdot c_7^{(4)} \quad (7)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na ugljenmonoksid:

$$G_1 \cdot c_8^{(1)} + G_2 \cdot c_8^{(2)} + G_3 \cdot c_8^{(3)} = G_4 \cdot c_8^{(4)} \quad (8)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na ugljendioksid:

$$G_1 \cdot c_9^{(1)} + G_2 \cdot c_9^{(2)} + G_3 \cdot c_9^{(3)} = G_4 \cdot c_9^{(4)} \quad (9)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na sumpordioksid:

$$G_1 \cdot c_{10}^{(1)} + G_2 \cdot c_{10}^{(2)} + G_3 \cdot c_{10}^{(3)} = G_4 \cdot c_{10}^{(4)} \quad (10)$$

Jednačina sastava toka 1:

$$c_1^{(1)} + c_2^{(1)} + c_3^{(1)} + c_4^{(1)} + c_5^{(1)} + c_6^{(1)} + c_7^{(1)} + c_8^{(1)} + c_9^{(1)} + c_{10}^{(1)} = 1 \quad (11)$$

Jednačina sastava toka 2:

$$c_1^{(2)} + c_2^{(2)} + c_3^{(2)} + c_4^{(2)} + c_5^{(2)} + c_6^{(2)} + c_7^{(2)} + c_8^{(2)} + c_9^{(2)} + c_{10}^{(2)} = 1 \quad (12)$$

Jednačina sastava toka 3:

$$c_1^{(3)} + c_2^{(3)} + c_3^{(3)} + c_4^{(3)} + c_5^{(3)} + c_6^{(3)} + c_7^{(3)} + c_8^{(3)} + c_9^{(3)} + c_{10}^{(3)} = 1 \quad (13)$$

Jednačina sastava smjese goriva:

$$c_1^{(4)} + c_2^{(4)} + c_3^{(4)} + c_4^{(4)} + c_5^{(4)} + c_6^{(4)} + c_7^{(4)} + c_8^{(4)} + c_9^{(4)} + c_{10}^{(4)} = 1 \quad (14)$$

Jednačine energetskog bilansa:

Na osnovu eksperimentalnih podataka o sastavu i fizičko-hemijskim karakteristikama goriva [6], formiraju se slijedeće jednačine energetskog bilansa za podsistem pripreme goriva :

Toplinski tok koji kruto gorivo (ugljena prašina) unese u sistem

$$H_1 = f(\Sigma c_i, t_1) \quad (15)$$

Toplinski tok koji koksni gas unese u sistem

$$H_6 = f(\Sigma c_i, t_2) \quad (16)$$

Toplinski tok koji tečno gorivo (mazut) unese u sistem

$$H_3 = f(\Sigma c_i, t_3) \quad (17)$$

Specifična toplina pare neophodna za predgrijavanje tečnog goriva:

$$dhp_1 = f(t_p) \quad (18)$$

Toplinski tok pare:

$$Qp_1 = dhp_1 \cdot Gp_1 \quad (19)$$

Jednačina totalnog bilansa mješača:

$$G_1 \cdot H_1 + G_2 \cdot H_2 + G_3 \cdot H_3 + Qp_1 = G_4 \cdot H_4 \quad (20)$$

Podsistem pripreme zraka

Materijalni bilans:

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na azot:

$$G_1 \cdot c_4^{(5)} = G_4 \cdot c_4^{(7)} \quad (21)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na kiseonik:

$$G_5 \cdot c_5^{(5)} + G_6 = G_7 \cdot c_5^{(7)} \quad (22)$$

Jednačina sastava toka "obogaćenog zraka":

$$c_4^{(7)} + c_5^{(7)} = 1 \quad (23)$$

Energetski bilans:

Pri formiranju jednačina energetskog bilansa neophodno je poznavati fizičko-hemijske karakteristike zraka, kiseonika i vodene pare [7]

Toplinski tok zraka:

$$H_3 = f(c_4^{(5)}, c_4^{(5)}, t_5) \quad (24)$$

Toplinski tok kiseonika:

$$H_5 = f(t_5) \quad (25)$$

Toplina pare neophodna za predgrijavanje zraka:

$$dhp_2 = f(t_p) \quad (26)$$

Protok toka pare:

$$Qp_2 = dhp_2 \cdot Gp_2 \quad (27)$$

Energetski bilans:

$$G_5 \cdot H_5 + G_6 \cdot H_6 + Q_{p2} = G_7 \cdot H_7 \quad (28)$$

Podsistem sagorijevanja "miješanog" goriva u struji "obogaćenog" zraka

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na ugljenik:

$$G_4 \cdot c_1^{(4)} - G_{r1}^{(I)} - G_{r1}^{(II)} = G_8 \cdot c_1^{(8)} \quad (29)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na vodonik:

$$G_4 \cdot c_2^{(4)} - G_{r2}^{(III)} = G_8 \cdot c_2^{(8)} \quad (30)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na sumpor:

$$G_4 \cdot c_3^{(4)} - G_{r3}^{(IV)} = G_8 \cdot c_3^{(8)} \quad (31)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na azot:

$$G_4 \cdot c_4^{(4)} + G_7 \cdot c_4^{(7)} = G_8 \cdot c_3^{(8)} \quad (32)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na kiseonik:

$$G_4 \cdot c_5^{(4)} + G_7 \cdot c_5^{(7)} - 0,5G_{r1}^{(I)} - G_{r1}^{(II)} - 0,5G_{r2}^{(III)} - G_{r3}^{(IV)} = G_8 \cdot c_5^{(8)} \quad (33)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na vodu:

$$G_4 \cdot c_6^{(4)} + G_{r2}^{(III)} = G_8 \cdot c_6^{(8)} \quad (34)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na pepeo:

$$G_4 \cdot c_7^{(4)} = G_8 \cdot c_7^{(8)} \quad (35)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na CO:

$$G_4 \cdot c_8^{(4)} + G_{r1}^{(I)} = G_8 \cdot c_8^{(8)} \quad (36)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na ugljendioksid:

$$G_4 \cdot c_9^{(4)} + G_{r1}^{(II)} = G_8 \cdot c_9^{(8)} \quad (37)$$

Jednačina materijalnog bilansa u odnosu na sumpordioksid:

$$G_4 \cdot c_{10}^{(4)} + G_{r3}^{(IV)} = G_8 \cdot c_{10}^{(8)} \quad (38)$$

Jednačina sastava toka plinskih produkata:

$$c_1^{(8)} + c_2^{(8)} + c_3^{(8)} + c_4^{(8)} + c_5^{(8)} + c_6^{(8)} + c_7^{(8)} + c_9^{(8)} + c_{10}^{(8)} = 1 \quad (39)$$

Suvišak zraka:

$$sz = (g_6 - tpz) / tpz \quad (40)$$

Selektivnos karbona:

$$b_1 = G_{r1}^{(I)} / (G_{r1}^{(I)} + G_{r1}^{(II)}) \quad (41)$$

Za proračun topline hemijskih reakcija neophodno je poznavati topline nastajanja pojedinih spojeva koji egzistiraju u hemijskim reakcijama [7]:

Toplina reakcije (I)

$$Dhr_1 = - G_{r1}^{(I)} \cdot (dhf_1) \cdot 1000 \quad (42)$$

Toplina reakcije (II)

$$Dhr_2 = - G_{r1}^{(II)} \cdot (dhf_2) \cdot 1000 \quad (43)$$

Toplina reakcije (III)

$$Dhr_3 = - G_{r2}^{(III)} \cdot (dhf_3) \cdot 1000 \quad (44)$$

Toplina reakcije (IV)

$$Dhr_4 = - G_{r3}^{(IV)} \cdot (dhf_4) \cdot 1000 \quad (45)$$

Ukupna toplina reakcije:

$$Dhr = Dhr_1 + Dhr_2 + Dhr_3 + Dhr_4 \quad (46)$$

Totalni energetski bilans:

$$G_4 \cdot H_4 + G_7 \cdot H_7 + Dhr = G_8 \cdot H_8 \quad (47)$$

Korak 3: Analiza sistema bilansnih jednačina procesne jedinice i određivanje broja stepeni slobode

Broj stepeni slobode hemijsko tehnološkog sistema predstavlja razliku između broja informacionih promjenjivih  $m$ , koje su nužne za sastavljanje potpunog matematičkog modela i broja informacionih  $n$  ili uslova, koji postoje između informacionih promjenjivih tj  $F=m-n$ , odnosno, to je broj slobodnih (nezavisnih), koje su nužne i dovoljne za jednoznačno predstavljanje procesa funkcionisanja sistema ili podsistema[8]. Sve promjenjive, koje u potpunosti karakteriziraju funkcionisanje sistema, dijele se na dvije grupe:

- projektne( zadane,utvrđene) promjenjive
- računске (tražene) promjenjive.

Projektne promjenjive su one informacione promjenjive koje karakterišu osnovni cilj funkcionisanja hemijsko-tehnološkog sistema, uticaj okoline na sistem, vezu sistema sa drugim hemijsko-tehnološkim sistemima i daju mogućnost optimizacije procesa u skladu sa nekim od kriterija.

Na osnovu zapisanog sistema jednačina za proces sagorijevanja goriva, broj nezavisnih relacija iznosi:

$$n= 47$$

broj slobodnih informacionih promjenjivih,

$$m=94$$

tako da je broj stepeni slobode:

$$F = m - n = 94 - 47 = 47$$

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Ovako formiran matematski model pruža mogućnost analize velikog broja realnih skupova utvđenih promjenjivih.

Orijentacija rješavanja sistema jednačina u funkciji je od zadatog problema koji se želi analizirati, odnosno formiranog skupa projektnih varijabli.

Primjer:

Potrebno je izračunati računске promjenjive za proces izgaranja goriva ako su poznate slijedeće projektne promjenjive:

- sastav (osim ugljenika) i temperatura toka čvrstog goriva
- sastav (osim ugljenika), temperatura i protok toka tečnog i parovitog goriva
- temperatura i protok miješanog goriva
- temperatura i protok kiseonika
- temperatura i sastav zraka
- temperatura i protok obogaćenog zraka
- koficijent suviška zraka i temperatura pare
- entalpije stvaranja CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>2</sub>

Skup računskih informacionih promjenjivih:

- sadržaj ugljenika u čvrstom, tečnom i parovitom gorivu
- protok toka čvrstog goriva, zraka i produkata sagorijevanja
- sastav toka miješanog goriva i “obogaćenog” zraka
- topline rekcija i procesnih tokova
- sastav toka produkata sagorijevanja
- reagirane (nastale) količine reaktanata (produkata)
- topline i protoci pare
- teorijski potreban zrak i koeficijent selektivnosti ugljenika

TABELA 1 PROJEKTNE I RAČUNSKE INFORMACIONE PROMJENJIVE TOKOVA FLOWSHEETA (PODVUČENOM LINIJOM SU OZNAČENE RAČUNSKE PROMJENJIVE)

	Tok1	Tok2	Tok3	Tok4	Tok5	Tok6	Tok7	Tok8
G, kmol/h	<u>45</u>	15	20	15	20	<u>30</u>	50	<u>69,77</u>
T (K)	298	298	298	298	298	298	298	
C <sub>1</sub>	<u>44,6</u>	<u>61,5</u>	<u>51,2</u>	<u>53,2</u>				0
C <sub>2</sub>	43,7	12,7	20,9	<u>9,2</u>				0
C <sub>3</sub>	1,20	2	1	<u>1,3</u>				0
C <sub>4</sub>	1,16	0,2	0,5	<u>0,8</u>		0,79	<u>47,4</u>	<u>35</u>
C <sub>5</sub>	11,4	0,4	10,79	<u>9,2</u>	1	0,21	<u>52,6</u>	<u>0,8</u>
C <sub>6</sub>	3	0,4	8	<u>3,8</u>				<u>14,9</u>
C <sub>7</sub>	35	1,62	0,2	<u>20</u>				<u>23</u>
C <sub>8</sub>	0,68	0,5	0,4	<u>0,6</u>				<u>39,2</u>
C <sub>9</sub>	0,2	0,6	7	<u>2</u>				<u>23,8</u>
C <sub>10</sub>	0,01	0,07	0,01	<u>2,125·10<sup>-5</sup></u>				<u>1,5</u>
H·10 <sup>3</sup>	<u>210,6</u>	<u>107,3</u>	<u>96,6</u>	<u>23,8</u>	<u>87,02</u>	<u>259,3</u>	<u>10,17</u>	<u>13371</u>

TABELA 2 TOPLINE TOKOVA I REAKCIJA (RAČUNSKE PROMJENJIVE)

	Dhr <sub>1</sub>	Dhr <sub>2</sub>	Dhr <sub>3</sub>	Dhr <sub>4</sub>	Dhr	Qp <sub>1</sub>	Qp <sub>2</sub>
Topline (kJ/h)	2,969·10 <sup>6</sup>	5,9072·10 <sup>6</sup>	1,7722·10 <sup>6</sup>	3,089·10 <sup>5</sup>	1,096·10 <sup>7</sup>	1,489·10 <sup>6</sup>	1,62·10 <sup>5</sup>

TABELA 3 TOPLINE STVARANJA[7], SUVIŠAN I TEORETSKI POTREBAN ZRAK, KOEFICIJENT SELEKTIVNOSTI I REGIRANE (NASTALE) KOLIČINE REAKTANATA (PRODUKATA) (PODVUČENOM LINIJOM SU OZNAČENE RAČUNSKE PROMJENJIVE).

	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	sZR	TPZ	b <sub>1</sub>	Gr <sub>1</sub> <sup>(I)</sup>	Gr <sub>3</sub> <sup>(IV)</sup>	Gr <sub>2</sub> <sup>(III)</sup>
Dhf(kJ/mol)	110,6	393,7	242	297,1						
mol/h								<u>26,84</u>	<u>1,04</u>	<u>7,32</u>
-					1,7	<u>11,11</u>	<u>0,64</u>			

#### 4.ZAKLJUČAK:

Realizirani matematski model omogućava proračun tehnoloških parametara procesnih tokova pri sagorijevanja goriva bez obzira na agregatno stanje goriva, uz uvođenje zraka (sa i bez predgrijavanja) sa i bez obogaćivanja tehničkim kiseonikom. Razvoj računske tehnike omogućio je da se problem “eksplozivnosti” u broju procesnih alternativa eliminira kao “usko grlo” u procesu izrade procesnog projekta[8] tako da se, u relativno kratkom vremenu, može analizirati veliki broj realnih sintetiziranih topoloških struktura.

Simboli:  
G-protok toka, kmol/h

Indeksi:  
p-para

---

c-sadržaj komponente, kmol/kmol	i-oznaka komponente	
H-entalpija toka ,kJ/kmol	Eksponenti:	
t ,T-temperatura toka,°C,K	j-oznaka toka	
dhp-specifična entalpija pare, kJ/kmol	I,II,III,IV-oznaka	hemijske
Qp-entalpija toka pare,kJ/kmol	reakcije	
G <sub>r</sub> -reagirane (nastale) količine rektanata (produkata), kJ/kmol		
Gp-tok pare, kJ/h		
sz-suvišan zrak		
tpz-teoretski potreban zrak		
b-koeficijent selektivnosti		
dhf-specifična entalpija nastajanja, kJ/kmol		
Dhr-toplina hemijske reakcije, kJ/kmol		
n-broj nezavisnih relacija		
m-broj slobodnih informacionih promjenjivih		
F-broj stepeni slobode		
SUV-skup utvrđenih varijabli		

---

## 5.LITERATURA

- [1] Grisogono, P.: Mogućnost povećanja učina instaliranih rotacionih peći s izmjenjivačem topline, Cement, 1 ,1979.
- [2] Bade, E.: Verfahren zur Reduzierung des Alkali-Kreislaufes beim Zementbrennen, Zement-Kalk-Gips, 9, 1962.
- [3] Radić, I.: Korištenje energije u pećima za sinterovanje portland cementnoga klinkera, Cement, 1, 1984 / 85.
- [4] Host M., Popović K., Uloga cementne industrije u zaštiti okoliša, Zbornik radova 17-savjetovanje o tehnološkim dostignućima u proizvodnji cementa, Split 1997 godine.
- [5] "JUCEMA", Istraživački odjel, Studija podobnosti povećanja proizvodnje klinkera i cementa, Zagreb, 1990
- [6] Elaborat, Analiza mogućnosti rada klinker peći nakon konverzije na gasovito gorivo, Mašinski fakultet Sarajevo, 1985,
- [7] Šef. F, Olujić. Ž, Projektiranje procesnih postrojenja SKHT/Kemija u industriji, Zagreb, 1988.
- [8] Douglas. J, Conceptual Design of Chemical Processes, McGraw-Hill, 1988,New York