

Izbor optimalne varijante mogućeg rešenja za postizanje zadate temperature u peći za sušenje pokrivne boje

Dr Milun Babić, dipl. inž., Milan Despotović, dipl. inž., i Vanja Bušetić, dipl. inž.,
Mašinski fakultet, Kragujevac

U radu je učinjen pokušaj da se formira matematički model peći za sušenje u industrijskim lakirnicama, koji bi mogao da pruži dovoljno pouzdane početne parametre za njihovo projektovanje. Model je zatim primenjen na postrojenju nekoliko industrijskih lakirnica u kojima je trebalo izabrati optimalnu varijantu mogućeg rešenja postizanja temperature u pećima za sušenje pokrivne boje pri rekonstruisanju peći. Takođe je razvijen i program kojim se uz pomoć računara simuliraju uticaji različitih parametara na visinu srednje temperature radnih komada. U radu je i grafički prikazano ponašanje peći prilikom promene njihovih energetskih komponentata odnosno njihovih konstrukcionih parametara.

Rad je urađen u okviru strateškog istraživanja projekta "Istraživanje i razvoj 'inteligentnih' procesnih postrojenja i njihovih visokoučinskih energetskih komponentata", koji finansiraju Ministarstvo za nauku i tehnologiju, "Zastava-alati", "Sloboda-aparati" i "Goša".

1. Uvod

Tehnologija sušenja boje nanete po spoljnim površinama radnih komada, koji se površinski zaštićuju i prolaze kroz peć za sušenje industrijske lakirnice, veoma je osetljiva na nivo temperature koji se ostvaruju u toj peći, kao i na dinamiku zagrevanja i hlađenja radnog komada, i bitno utiče na to da jedna ista, sveža pokrivna boja, ima bolja ili lošija zaštitna i estetska svojstva na završetku faze sušenja, u zavisnosti od toga koliko se proces sušenja približio optimalnim tehnološkim zahtevima sušenja te pokrivne boje.

U cilju pretprojektnog i projektog sagledavanja graničnih kapaciteta peći za sušenje industrijskih lakirnica, pri utvrđivanju kriterijuma za izbor prateće opreme i nastojanjima da se energetski procesi optimiziraju, veoma je važno znati "ponašanje" peći za sušenje pokrivne boje pri promeni jednog, ili više, energetskih, odnosno konstrukcionih parametara.

U ovom radu je učinjen pokušaj da se izloži matematički model koji može da pruži dovoljno pouzdane parametre za optimalno projektovanje peći za sušenje u industrijskim lakirnicama, a koji je razvijen i parcijalno saopštavan u lit. [1, 2 i 3].

2. Opis matematičkog modela

Peć za sušenje pokrivne boje, termodinamički gledano, predstavlja posredan razmenjivač toplote, pa se termodinamički procesi u njoj mogu matematički modelirati, uz pomoć šeme prikazane na sl. 1.

U energetskom monobloku (2) se posredstvom razmenjivača toplote predaje toplota kondenzovanja Q vodene pare – ma-

senom protoku vazduha \dot{m}_2 , koji pod dejstvom ventilatorske grupe struji kroz taj razmenjivač. Pri tome temperatura vazduha poraste od temperature t_{1u} na ulazu u energetski monoblok, do temperature t_{1i} na izlazu iz monobloka. Temperatura vode nastala kondenzovanjem vodene pare u razmenjivaču, na izlazu iz razmenjivača ostaje t_p , tj. jednaka temperaturi vodene pare na ulazu u razmenjivač.

Deo toplotne energije \dot{Q}_g , od one koja se razmeni u razmenjivaču, izgubi se kroz zidove monobloka, tako da vazduh sa sobom iz energetskog monobloka iznosi:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q} - \dot{Q}_g \quad (1)$$

toplotne energije u jedinici vremena.

Kroz vod (8) iz sistema se odvodi $\dot{Q}_{\Delta m_2}^1$ toplote zbog izvođenja iz sistema Δm_2 izrađenog vazduha, a preostala toplota $Q_1 - Q_{\Delta m_2}^1$ nastavlja kroz potisni vazdušni vod prema peći. Deo toplote Q_{g1} izgubi se na tom putu zbog nemogućnosti da se zidovi potisnog vazdušnog voda potpuno izoluju od okoline, tako da se u peć unese toplotna energija:

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q} - \dot{Q}_g - \dot{Q}_{\Delta m_2}^1 - \dot{Q}_{g1} \quad (2)$$

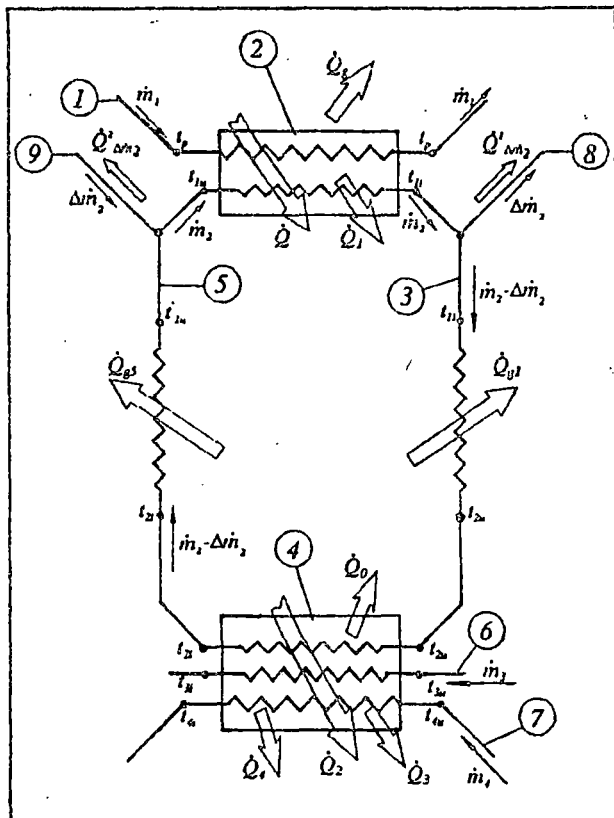
Usled toplotnih gubitaka u potisnom vazdušnom vodu (3) temperatura vazduha opadne od t_{1i} na izlazu iz monobloka, do t_{2u} na ulazu u peć (4).

Dovedena toplotna energija \dot{Q}_2 troši se na pokrivanje toplotnih gubitaka, koji su uvek prisutni u procesu razmene toplotne energije, i na zagrevanje radnih komada i dela transportera koji prolaze kroz peć, pa se može konstatovati da je:

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_0 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 \quad (3)$$

pri čemu je:

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_{01} + \dot{Q}_{02} + \dot{Q}_{03} + \dot{Q}_{04} + \dot{Q}_{05} \quad (4)$$



Slika 1.

Zbog predavanja toplote radnim komadima i transporteru, koji "proteću" kroz peć, kao i zbog toplotnih gubitaka u peći, ulazna temperatura vazduha t_{2u} opada, tako da na izlazu iz peći iznosi t_{2i} . Međutim, zbog dovedene toplote, temperature radnih komada i transporterata rastu od ulaznih t_{3u} , odnosno t_{4u} do t_{3i} odnosno t_{4i} .

Vazduh se, zajedno sa isparenjima boje, nakon prolaska kroz peć, povratnim vodom (5) vraća prema ulazu u energetski monoblok. Pritome, on kroz zidove povratnog voda gubi Q_{g5} toplote, usled čega mu temperatura dalje opada na t'_{1u} .

Kroz vod za dovođenje svežeg vazduha (9) usisava se stalno svež vazduh sa masenim protokom $\Delta \dot{m}_2$ usled čega se "gubi" dodatna količina toplote $Q_{\Delta \dot{m}_2}^2$, što uslovljava da temperatura vazduha na ulazu u monoblok opadne na t_{1u} . Zatim se napred opisani proces ponavlja.

Na osnovu analize toplotnih gubitaka u razmatranom posrednom razmenjivaču toplote, mogu se uspostaviti sledeće veze između temperatura u njegovim karakterističnim tačkama:

$$t'_{1u} = t_a + (t_{2i} - t_a) e^{-A_{g5}} \quad (5)$$

$$t_{1u} = \left(1 - \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_2}\right) t'_{1u} + \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_2} t_a \quad (6)$$

$$t_{1i} = t_p - (t_p - t_{1u}) e^{-A_R} \quad (7)$$

$$t_{2u} = t_a + (t_{1i} - t_a) e^{-A_{g1}} \quad (8)$$

$$t_{3i} = t_{2i} - (t_{2u} - t_{3u}) e^{-A_{g3}} \left(1 + \frac{t_{2u} - t_{2i}}{t_{3i} - t_{3u}}\right) \quad (9)$$

$$t_{4i} = t_{2i} - (t_{2u} - t_{4u}) e^{-A_{g4}} \left(1 + \frac{t_{2u} - t_{2i}}{t_{4i} - t_{4u}}\right) \quad (10)$$

$$t_{2i} = t_{2u} - \frac{Q_2}{\dot{m}_2 \left(1 - \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_2}\right) c_p} \quad (11)$$

Da bi se dobijeni sistem jednačina (5-11) mogao rešiti, potrebno je koristiti iterativni postupak.

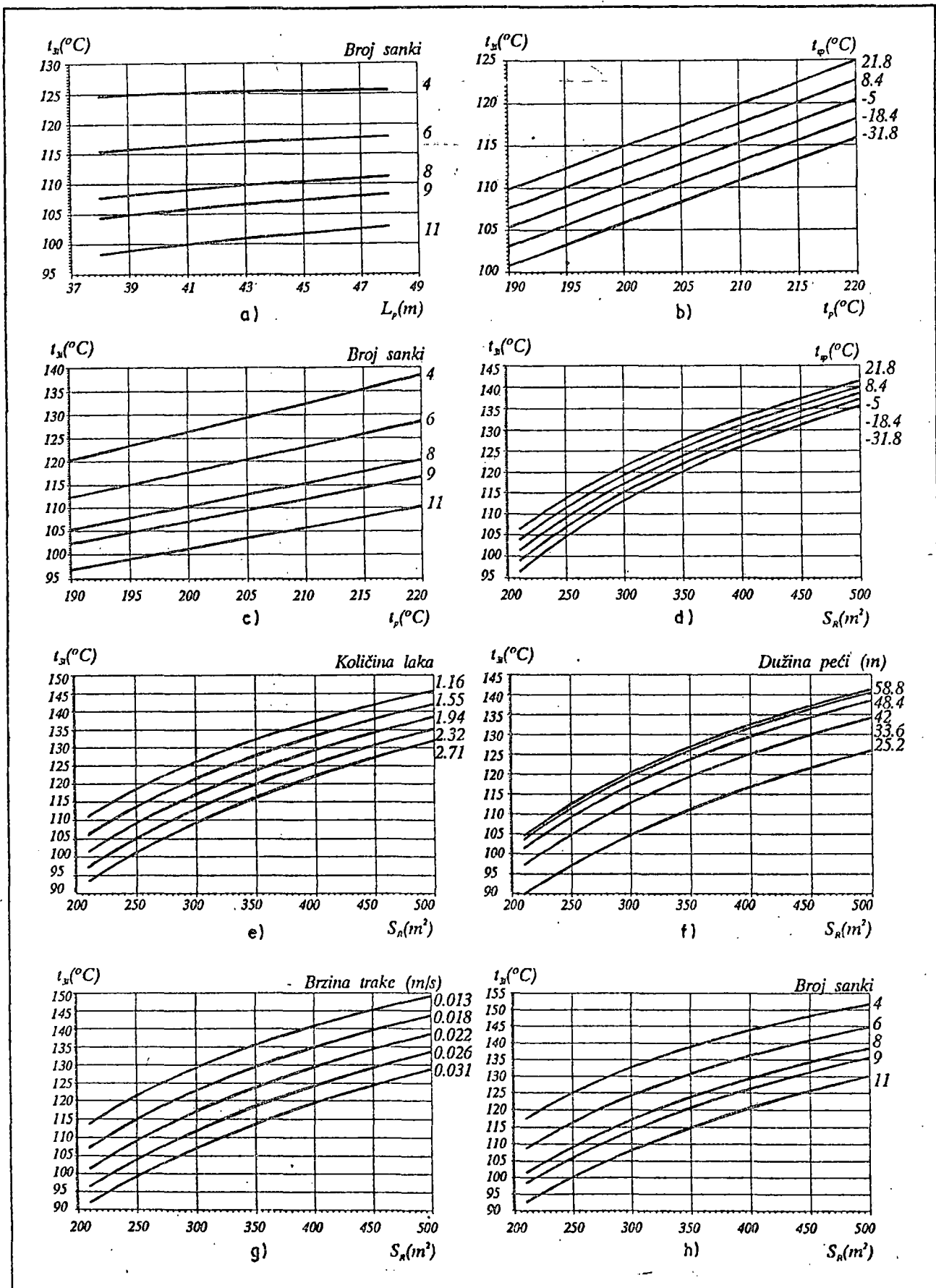
3. Osvrt na razvijeni kompjuterski program

Na osnovu napred izloženog matematičkog modela, razvijen je kompjuterski program, profesionalnog tipa, a pristup programu se ostvaruje uz pomoć maski, čiji je izgled prikazan na sl. 2.

Izlazne rezultate proračuna program prezentira tabelarno i grafički, i to na način koji omogućuje brz i očigledan uvid u uticaj pojedinačnih energetskih, konstrukcionih i drugih karakteristika peći na temperaturu vazduha, odnosno radnih komada, koji se u njoj suše.

Start	Unos i pregled podataka		Program
Ime	Vrednost	Pomoć za ULPROM	Postojeća: [LAKIRNICA] 62/67
UK	1001	Broj ulazne promenljive	
TAKT	586.2	1 - Temperatura ambijenta	
BRZINA	0.022	2 - Broj kolica koji staju u peći	
GL	1.94	3 - Temperatura pare u grejačima	
GW	0	4 - Pritisak u ambijentu	
ML	12.2	5 - Brzina kretanja transporterata	
RL	523.350	6 - Dozvoljeni iznos razređivača	
RW	0.2258+04	7 - Dozvoljeni iznos vode	
RWP	1947000	8 - Količina laka po kabini	
KR	28.494	9 - Količina vode po kabini	
SR	252	10 - Površina razmenjivača toplote	
MTZ	69	11 - Maseni protok vazduha	
ULPROM	10	12 - Temperatura spoljašnjeg vazduha	
OD	210	13 - Temperatura školjke na ulazu u peć	
DO	500	14 - Dužina peći	
BRPODEL	50	15 - Debljina zida povratnog voda	
IZLPROM	6		

Slika 2.



Slika 3.

Kao primer nekih od mogućnosti razvijenog programa, na sl. 3. su izložene grafičke interpretacije simuliranja uticaja pojedinih konstrukcionih i energetskih parametara, kao i uticaj radnog režima, na srednju temperaturu ambijenta u peći, dobijene prilikom razmatranja optimalnog pristupa rekonstrukciji peći za sušenje pokrivne boje u okviru jedne automobilske lakirnice.

Ako bi, recimo, cilj spomenute rekonstrukcije peći bio da se sa minimalnim ulaganjima ona rekonstruiše, zbog novih potreba tehnologije, tako da se u njenom radnom prostoru ostvaruje ambijentalna temperatura od 135°C, onda bi na osnovu dijagrama prikazanih na sl. 3. mogli doći do sledećih saznanja:

1. Uticaj dužine peći na temperaturu školjke je zanemarljiv (sl. 3a). Zbog toga se eventualno produženje peći ne preporučuje kao jedna od mera rekonstrukcije lakirnice.
2. Sa povećanjem protoka vazduha (tj. zamenom postojećih ventilatora u energetskom monobloku), veoma malo se menja temperatura automobilskih školjki. Zbog toga kao i zbog činjenice da bi se povećanjem protoka vazduha kroz peć došlo do drugih neželjenih pojava (kao što je, recimo, povećanje prašine u ambijentu), ni ova mera ne bi se mogla preporučiti kao moguć pravac rekonstrukcije peći.
3. Na sl. 3b i 3c prezentirana je analiza uticaja temperature (pritiska) napojne vodene pare u primarnom vodu, iz koga se snabdeva lakirnica, i uticaj spoljašnje temperature vazduha na temperaturu automobilske školjke. Očigledno je da bi se podizanjem kvaliteta pare, sa 198,28°C na 220°C, temperature školjke približile željenoj temperaturi od 135°C u letnjim uslovima ($t_{sp} = 21,8^\circ\text{C}$), ali to ne bi bilo moguće ostvariti u zimskim radnim režimima. Na dijagramu na sl. 3c može se videti da bi kombinovanjem dejstva koja bi značila s jedne strane povećanje kvaliteta pare u primarnim vodovima i, s druge strane, smanjivanje proizvodnje automobila (koje bi se ogledalo kroz smanjivanje broja "sanki" koje prolaze kroz lakirnicu), mogli postići rezultati približni projektnim ambijentnim uslovima u peći, tj. 135°C.
4. Uticaj površine razmenjivača koji učestvuju u prenosu toplotne energije vodene pare iz primarnog voda na vazduh kojim se zagrevaju automobilske školjke u peći, analiziran je na dijagramima na sl. 3d do sl. 3h uz variranje:
 - temperature spoljašnjeg vazduha (sl. 3d),
 - količine laka po jednoj automobilskoj školjki (sl. 3e),
 - dužina peći (sl. 3f),
 - brzine transportera koji nosi automobilske školjke kroz lakirnicu (sl. 3g),
 - broja sanki (sl. 3h).

Odatle se vidi veoma veliki uticaj površine kondenzacionih razmenjivača u energetskom monobloku na temperature školjki u peći, pa se može zaključiti da bi, za nepromenjenu brzinu i kvalitet tehnološkog procesa proizvodnje i za zimske uslove rada, neophodno bilo znatno povećati površinu kondenzacionih razmenjivača u energetskim monoblokovima peći.

Simulacija radnog procesa pokazuje da bi ukupna površina svih kondenzacionih razmenjivača na lakirnici morala da bude $\geq 500 \text{ m}^2$, da bi temperatura automobilskih školjki bila oko projektovane vrednosti od 135°C.

U analizi je tretirano i simulirano, kao moguće rešenje i pregrevanje automobilskih školjki, uvođenjem novih infracrvenih grejača u lakirnicu. Došlo se do zaključka da se tako ne bi bitno promenilo izvedeno stanje.

4. Zaključak

Na osnovu višekratnog testiranja razvijenog kompjuterskog programa, kao i na osnovu rezultata njegove primene prilikom projektovanja novih i rekonstrukcija postojećih industrijskih peći za sušenje pokrivne boje u industrijskim postrojenjima

površinske zaštite, autori ovoga rada su došli do zaključaka da on ima sledeća svojstva:

- daje rezultate koji su veoma bliski stvarnim vrednostima,
- ima veliku varijabilnost i prilagodljivost različitim projektnim rešenjima peći,
- ne zauzima veliki memorijski prostor i izvršavanje mu je veoma kratko,
- mogu ga upotrebljavati korisnici različitih stručnosti.

5. Oznake

- t' - temperatura vazduha na ulasku u monoblok pre uvođenja svežeg vazduha
- t_{1u} - temperatura vazduha na ulazu u monoblok nakon uvođenja svežeg vazduha
- t_{1i} - temperatura vazduha na izlazu iz monobloka
- t_{2u} - temperatura vazduha na izlazu iz monobloka
- t_{2i} - temperatura vazduha na ulazu u peć
- t_{3u} - temperatura vazduha na izlazu iz peći
- t_{3i} - ulazna temperatura radnog komada
- t_{4u} - ulazna temperatura transportera
- t_{4i} - izlazna temperatura transportera
- t_a - temperatura okoline (ambijenta)
- t_{sp} - temperatura spoljašnjeg vazduha
- t_p - temperatura pare
- Q - toplota kondenzovanja pare
- Q_1 - toplota koju iz monobloka "iznese" vazduh
- Q_2 - toplota koju vazduh "doneše" u peć
- Q_3 - količina toplote koju vazduh preda radnim komadima u peći
- Q_4 - količina toplote koju vazduh preda transporteru
- Q_g - toplotni gubici u monobloku
- Q_{g1} - toplotni gubici u potisnom vazдушnom vodu
- Q_{g5} - toplotni gubici u povratnom vazдушnom vodu
- Q_0 - toplotni gubici u peći
- Q_{01} - toplotni gubici kroz zidove peći
- Q_{02} - toplotni gubici kroz pod peći
- Q_{03} - toplotni gubici izazvani zagrevanjem hladnog vazduha koji ulazi kroz ulazna i izlazna vrata peći
- Q_{04} - toplotni gubici izazvani zagrevanjem i isparavanjem celokupne količine razređivača koji se nalazi u boji i PVC-u a koji pokrivaju zidove radnih komada
- Q_{05} - toplotni gubici izazvani zagrevanjem i isparavanjem vode koja je zaostala na radnim komadima i transporteru kao rezultat prethodnih koraka tehnološkog procesa bojenja
- $Q_{\Delta m}^1$ - toplota koju sa sobom odnosi izradeni vazduh koji se odvodi u atmosferu
- $Q_{\Delta m}^2$ - toplota koja se utroši na zagrevanje svežeg vazduha koji se uvodi u sistem
- \dot{m}_2 - maseni protok vazduha kroz monoblok
- $\Delta \dot{m}_2$ - maseni protok svežeg, odnosno izradenog vazduha, koji se uvodi odnosno izvodi iz sistema
- \dot{m}_3 - maseni protok radnih komada kroz peć
- \dot{m}_4 - maseni protok transportera kroz peć
- c_p - specifična toplota vazduha pri konstantnom pritisku
- c_3 - specifična toplota materijala od koga su napravljene radni komadi
- c_4 - specifična toplota materijala od koga je napravljen transporter
- k_{g1} - koeficijent provođenja toplote zidova potisnog vazdušnog voda
- k_{g3} - koeficijent provođenja toplote sloja boje koja se nalazi na radnom komadu
- k_{g4} - koeficijent provođenja toplote sloja boje koji se nataložio na transporteru
- k_{g5} - koeficijent provođenja toplote zidova povratnog vazdušnog voda
- k_R - koeficijent provođenja toplote parnog razmenjivača

- S_{g1} – površina zidova potisnog vazduhovoda
 S_{g3} – ukupna površina svih radnih komada koji jednovremeno mogu da se nađu u peći
 S_{g4} – ukupna površina dela transportera koji se nalazi u peći
 S_{g5} – ukupna površina zidova povratnog vazdušnog voda
 S_R – površina parnog razmenjivača koji se nalazi u monobloku
 L_p – dužina peći

$$A_{g1} = \frac{k_{g1} S_{g1}}{\dot{m}_2 \left(1 - \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_2}\right) c_p} \quad \text{-- koeficijent}$$

$$A_{g3} = \frac{k_{g3} S_{g3}}{c_3 \dot{m}_3} \quad \text{-- koeficijent}$$

$$A_{g4} = \frac{k_{g4} S_{g4}}{c_4 \dot{m}_4} \quad \text{-- koeficijent}$$

$$A_{g5} = \frac{k_{g5} S_{g5}}{\dot{m}_2 \left(1 - \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_2}\right) c_p} \quad \text{-- koeficijent}$$

6. Literatura

- [1] Babić, M. i dr: *Razvijanje matematičkog modela za proračun peći za sušenje boje u lakirnicama, i njegova konkretizacija na lakirnici "Kamioni"*, naučnoistraživački projekat raden za OOUR "Mašine", ZCZ, Kragujevac, 1982.
- [2] Babić, M., Bojić, M., Slavković, R., Marković, M., Milanović, S.: *Prilog matematičkom modeliranju procesa u posrednim razmenjivačima toplote*, XIII seminar o KGH, SMEITS, Beograd, 1982.
- [3] Babić, M., Despotović, M., Bušetić, V.: *Analiza rada lakirnice fabrike "Površinska zaštita" u "Zastavi"*, Mašinski fakultet Kragujevac, mart 1992.

PROCESNA
TEHNIKA

Modelovanje procesa apsorpcije praćene hemijskom reakcijom u tečnosti pri stepenom kontaktu između faza

Dr Branislav Jaćimović, dipl. inž., Srbišlav Genić, dipl. inž.,
Mašinski fakultet, 27. marta 80, 11000 Beograd

U radu se analizira mogućnost modelovanja procesa apsorpcije praćene trenutnim i brzim hemijskim reakcijama u tečnosti, pri stepenom kontaktu između gasa i tečnosti. Osnovni problem pri modelovanju ovog procesa je da se ne može primeniti koncept određivanja broja teorijskih stepeni kontakta i efikasnosti kolone, na osnovu kojih je moguće odrediti broj stvarnih podova u apsorberu. Ova vrsta aparata ima veliku primenu u procesnoj industriji, npr. za izdvajanje H_2S i CO_2 iz produkata sagorevanja prirodnog i koksnog gasa pomoću vodenih rastvora etanolamina.

1. Uvod

Apsorpcija praćena hemijskom reakcijom (hemisorpcija) je operacija koja ima značajno mesto u hemijskoj tehnologiji. Hemijska reakcija, koja se odigrava u tečnoj fazi između apsorptiva i rastvorenog reaktanta – aktivnog dela apsorbera, pri pravilnom izboru reaktanta znatno povećava efikasnost procesa. Na taj način se smanjuju dimenzije aparata i prateće opreme, što utiče na smanjenje ulaganja [1].

Postoji veliki broj hemisorpcionih procesa koji su našli industrijsku primenu [2, 3]:

- apsorpcija H_2S i CO_2 iz produkata sagorevanja, prirodnog i koksnog gasa pomoću vodenih rastvora etanolamina, radi dobijanja H_2SO_4 i CO_2 ;
- apsorpcija SO_2 iz dimnog gasa pomoću krečnog mleka, u cilju zaštite čovekove okoline;

– apsorpcija etilena iz atmosfere rashladnih komora pomoću vodenog rastvora kalijumpermanganata, radi sprečavanja procesa truljenja voća [4, 5].

Hemisorpcija se najčešće obavlja u aparatima sa kontinualnim i stepenim kontaktom između faza.

U aparatima sa kontinualnim kontaktom između faza se najčešće koriste različite vrste ispune uglavnom od keramike, zbog korozivnog dejstva materija koje su prisutne u procesu. Loše strane primene keramičke ispune se ogledaju u velikim gabaritima aparata i velikoj masi ispune. Pri eventualnom pulzacionom radu, može doći do loma ispune, što posle određenog vremenskog perioda zahteva njenu zamenu. Aparat sa ispunom nije pogodan ni u slučaju kada se javlja čvrsta faza u sistemu. Iz tih razloga se preporučuje, kad god je moguće, primena kolona sa podovima. Osnovni nedostatak kolone sa podovima je veći pad pritiska u odnosu na kolone sa ispunom u istim radnim uslovima.