

# Racionalizacija rada postrojenja za sušenje rezanaca šećerne repe

M. I. Nedeljkov, U. Đ. Timotić, M. P. Stakić i Đ. S. Bašić,  
Fakultet tehničkih nauka, 21000 Novi Sad,  
Trg Dositeja Obradovića 2

*U radu se iznose predlozi za energetske racionalizacije rada dehidratora, koji ne zahtevaju nikakva ulaganja. Izloženi su pregled veličina merenih tokom ispitivanja rada dehidratora, u pogonskim uslovima, pri sušenju rezanaca šećerne repe, i najvažniji pokazatelji kvaliteta rada. Na kraju rada su izneseni efekti preduzetih mera i poređenja sa stanjem pre intervencija na racionalizaciji rada dehidratora.*

## 1. Uvod

Poznato je da se u procesu sušenja troše velike količine toplotne energije, pa je razumljiva težnja da se raznim postupcima obezbedi povišenje stepena energetske efikasnosti, kako proučavanjem procesa razmene toplote i vlage i načina njihovog ostvarivanja, tako i tehničkim inovacijama i novim konstrukcijama, te boljim vođenjem procesa i proverom da li se postrojenje ponaša u skladu sa željama projekatanta. Utvrđivanje stvarnih pokazatelja kvaliteta rada precesnih uređaja kao i efekata primene pojedinih postupaka i predloga za racionalizaciju, izrazito su otežani u složenim termodifuzionim procesima, kao što je konvektivno sušenje. Da bi se mogli oceniti rad i rukovanje sušarom, nužno je da se osnovni pokazatelji kvaliteta rada sušare (specifična potrošnja toplotne energije, kapacitet i kvalitet osušenog proizvoda) utvrde jednoznačno i objektivno. Ukoliko se ispitivanjima postignu slabiji rezultati od očekivanih (projektovanih, deklariranih), može se sva krivica neopravdano svaliti na konstrukciju, ili zahvate rekonstrukcije, ukoliko se u analizu ne uključe i realni uslovi odvijanja procesa. I obrnuto: ukoliko se postignu povoljniji rezultati, oni ne moraju biti isključivo posledica dobre konstrukcije ili valjanih intervencija, nego mogu biti rezultat povoljnih uslova odvijanja procesa. S druge strane, utvrđivanjem realnih pokazatelja kvaliteta rada sušare istovremeno se utvrđuju i raspoložive mogućnosti (koje su eventualno ostale neiskorišćene), poređenjem sa maksimalnim efektima koji se u datim okolnostima mogu postići.

## 2. Materijal i metod rada

Na osnovu detaljnog snimanja rada dehidratora za sušenje rezanaca šećerne repe u pogonskim uslovima, utvrđeni su izvori odstupanja od projektovanog rada dehidratora i uočene mogućnosti za racionalniji rad. Pritom je postavljen zahtev da se intervencije izvedu bez ometanja rada dehidratora u kampanji prerade šećerne repe i da se ne preduzimaju nikakvi investicioni zahvati.

Da bi se ovi zadaci rešili, izvršen je termokinetički proračun

dehidratora, postavljen detaljan scenario merenja, izvršena su merenja za više različitih režima rada dehidratora, analizirani su rezultati ispitivanja i date preporuke za bolje vođenje procesa. Termokinetičkim proračunom omogućuje se određivanje svih relevantnih parametara, koji se odnose na stanje agensa sušenja na ulazu u sušaru, zavisno od protoka goriva, količine predgrejanog vazduha za sagorevanje i stanja i količine recirkulisanog otpadnog gasa.

Zavisno od protoka i stanja vlažnih rezanaca na ulazu, količine prisisanog ("fals") vazduha gubitaka u okolinu i zahtevane vlažnosti rezanaca na izlazu iz dehidratora, iterativnim postupkom se utvrđuju stanje agensa sušenja na izlazu iz dehidratora, zavisno od stanja osušenih rezanaca, kao i specifična potrošnja toplotne energije (po jedinici isparene vlage svedeno na 100 kg osušenih rezanaca).

Izučavanje procesa razmene toplote i vlage u dehidratorima je vrlo kompleksan problem, pre svega zbog složenih uslova odvijanja procesa. Termodifuzionim proces razmene toplote i vlage u bubnju dehidratora odvija se uz pojave kao što su: lepljenje čestica radne materije, nejednako opstrujavanje agensom pri njihovom padanju sa jedne na drugu lopaticu, uz različitu popunjenost česticama prostora za razmenu duž bubnja i uz neprekidno obrtanje bubnja i stvaranje novih strujnih, temperaturnih i koncentracijskih slika.

Sa druge strane, čestice, posle kratkog kontakta sa agensom sušenja, ostali deo vremena provode na lopaticama na najnižem delu bubnja. Za ovaj period, tzv. period odležavanja, kada rezanci ne padaju sa lopatica, isparavanje vlage sa površina rezanaca nije toliko intenzivno, a kod onih čestica koje nisu tog trenutka u kontaktu sa agensom sušenja, isparavanje se prekida. Istovremeno započinje relaksacija i smanjivanje temperaturnih i koncentracijskih neravnomernosti u materijalu.

Zbog toga je termokinetički proračun izvršen uz usvajanje da se složeni termodifuzionim problem prenosa toplote i vlage, koji se odvija u dehidratoru, tretira kao toplotni problem. Osnovne predloge i inspiracija za ovakav pristup termokinetičkom proračunu usvojene su iz literature [1]. S obzirom da se u ovom slučaju proces sušenja tretira kao toplotni problem, nema suštinskih razlika u odnosu na proračun toplotnih razmenjivača. Rešenje ovog zadatka u ovom slučaju svodi se na rešavanje jednačine (1):

$$Q_z + Q_i = 3,6 \cdot \sum_{i=1}^n (F_i \alpha_i) \Delta T_{\pi} V_{b_i} \quad (1)$$

gde su:

- $Q_z$  i  $Q_i$  – odgovarajuće količine toplote potrebne za zagrevanje materijala i isparavanje vlage [kJ/h];
- $V_{b_i}$  [m<sup>3</sup>] – zapremina proračunske sekcije bubnja;
- $dT_{\pi i}$  – srednja logaritamska razlika temperatura gasa i materijala u proračunskoj sekciji;

$F_i$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] – površina materijala koja ujedno predstavlja površinu za razmenu toplote u odnosu na 1 m<sup>3</sup> bubnja proračunske sekcije;

$\alpha$  [W/m<sup>2</sup>K] – koeficijent prelaza toplote.

Znak  $\Sigma$  u jednačini (1) označava da se razmena toplote duž bubnja ne odvija istim intenzitetom. Pogodno je da se u proračunu operiše sa proizvodom  $\alpha F = \alpha_v$  (zapreminski koeficijent prelaza toplote), koji karakteriše količinu toplote, predatu od agensa sušenja materijalu po jedinici zapremine bubnja. U dehidratorima se toplota predaje materijalu na tri osnovna načina:

- kroz površine koje rezanci obrazuju pri njihovom padanju sa lopatica ( $Q^I$ );
- kroz otkrivenu površinu materijala koji se nalazi na lopaticama u najnižem delu bubnja ( $Q^II$ );
- kao rezultat kontakta materijala, elemenata ispune i unutrašnjeg obima bubnja – putem prevođenja ( $Q^III$ ).

Može se napisati da je ukupni zapreminski koeficijent prelaza toplote  $i$ -te proračunske sekcije sastavljen od:

$$\alpha_v = \alpha'_v + \alpha''_v + \alpha'''_v \quad [\text{W}/\text{m}^3\text{K}] \quad (2)$$

$\alpha'_v$  – definiše toplotu predatu materijalu pri njegovom padanju:

$$\alpha'_v = \alpha \alpha'_k F'_m + \alpha_{sr} F^0 \quad (3)$$

Zbog specifičnosti problema, toplota koja se radnoj materiji predaje zračenjem posebno će se obračunavati. U izrazu (3) je:

$\alpha$  – koeficijent popravke koji se uvodi zbog značajne razlike između stvarne i proračunske površine za razmenu toplote i zavisi od veličine  $F_m$ . Obuhvata sve osobenosti razmene toplote pri padanju radne materije sa lopatica ispune dehidratora;

$\alpha'_k$  – koeficijent prelaza toplote konvekcijom, koji može da se izračunava iz eksperimentalno dobijenih jednačina pri sušenju u lebdećem stanju. Pri njegovom izračunavanju mora se uočiti da je brzina agensa na površini radne materije sastavljena od brzine kojom radna materija pada sa lopatica i brzine agensa kroz bubanj.

Drugi deo zapreminskog koeficijenta prelaza toplote  $\alpha''_v$  koji karakteriše razmenu toplote kroz spoljašnju površinu sloja materijala koji se nalazi na lopaticama i donjem delu bubnja je:

$$\alpha''_v = \alpha''_k F''_m + \alpha_{sr} F''_m \quad (4)$$

gde su:

$F''_m$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] – spoljašnja otkrivena površina materijala koji se nalazi na lopaticama i donjem delu bubnja;

$\alpha''_k$  – koeficijent prelaza toplote u odnosu na tu površinu, koji uzima u obzir sve osobenosti pri neprekidnom obnavljanju površine. Izračunava se iz kriterijalne jednačine.

Pri izračunavanju  $\alpha''_v$  zapreminskog koeficijenta prelaza toplote koji uzima u obzir toplotu predatu materijalu od zagrejanih elemenata ispune i unutrašnjeg obima bubnja, treba izračunati njihovu temperaturu. Pri svakom obrtaju bubnja elementi ispune i deo obima bubnja ostaju neko vreme nepokriveni materijalom, usled čega se kao rezultat neposrednog kontakta sa agensom sušenja oni zagrevaju, a zatim pri kontaktu sa radnom materijom predaju energiju dobijenu od agensa.

Temperatura elemenata ispune i dela unutrašnjeg obima bubnja određuje se iz izraza:

$$T_i = \frac{\bar{v}_m + (\alpha_{ig}/\alpha_{im}) \cdot (F''_g/F''_z) \cdot T_{sr}}{1 + (\alpha_{ig}/\alpha_{im}) \cdot (F''_g/F''_z)} \quad [\text{K}] \quad (5)$$

$$\frac{\alpha_{ig}}{\alpha_{im}} = (9,71 + 6,62 \cdot \sqrt{\rho W}) \cdot (\Delta \tau)^{0,5} (\lambda_m c_m \rho_m)^{-0,5} \quad (6)$$

$$\alpha'''_v = \frac{F''_z \alpha_{im} \cdot (T_i - v_m)}{\Delta T_{sr}} = \frac{F''_g \alpha_{ig} \cdot (T_{sr} - T_i)}{\Delta T_{sr}} \quad (7)$$

Pri ovakvom vršenju proračuna procesa sušenja glavni zadatak je određivanje površina za razmenu toplote. Međutim, obrtanjem bubnja, količina materijala koja se nalazi na lopaticama neprekidno se menja, pa prema tome i količina materijala koja pada sa lopatica nije konstantna, zbog čega je površina za razmenu toplote promenljiva. Pored toga, neprekidno se menja i otkrivena površina sloja materijala koji se nalazi na lopaticama kao i površina lopatica koja nije zauzeta materijalom. Za određivanje površine za razmenu toplote suštinska je činjenica da se sve ove površine mogu okarakterisati bezdimenzijskim parametrima – veličinama koje su sa jedne strane proporcionalne ovim površinama, a s druge strane zavise samo od konstrukcije ispune unutrašnjosti bubnja.

Količina toplote predata materijalu zračenjem je:

$$q_{sr} = \varepsilon'_z C_c \left[ \varepsilon_g \left( \frac{T_{sr}}{100} \right)^4 - \alpha_\lambda \left( \frac{v_m}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (8)$$

gde su:

$\varepsilon'_z = 0,5(1 + \varepsilon_z)$  – efektivni koeficijent emisije tela sive površine;

$\varepsilon_z$  – koeficijent emisije tela sive površine;

$$C_c = 5,76 \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$$

$T_{sr}$  [K] – srednja temperatura agensa za sušenje;

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\text{CO}_2} \gamma + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \beta - \Delta \varepsilon_g \quad (9)$$

$\varepsilon_g$  – koeficijent emisije smeše gasova;

$\varepsilon_{\text{CO}_2}$  – koeficijent emisije CO<sub>2</sub> (pri  $p_1 = 100$  kPa)

$\gamma$  – koeficijent popravke za različite vrednosti  $P_t$

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – redukovani koeficijent emisije H<sub>2</sub>O;

$\beta$  – koeficijent popravke za različite vrednosti  $P_t$  i  $P_{H_2O}$ ;

$a_\lambda$  – koeficijent apsorpcije smeše gasova.

Površina materijala koja prima toplotu zračenjem je:

$$F''_m = F''_m^0 + F''_m \quad [\text{m}^2/\text{m}^3] \quad (10)$$

$F''_m^0$  – spoljna površina čestica koje padaju sa lopatica po 1 m<sup>3</sup>

$$F''_m^0 = \frac{4}{\pi} (Z-1) \frac{h_{sr}}{D_b^2} \quad [\text{m}^2/\text{m}^3] \quad (11)$$

$$F''_m = \frac{4}{\pi} D_b^{-1} \left( \frac{S}{D_b} + (Z-1) \frac{h_{sr}}{D_b} \right) \quad (12)$$

$$Q_{zv} = q_{zv} F_m^2 V_b \quad [\text{kJ/h}] \quad (13)$$

Dobijeni rezultati upoređeni su, uz zadovoljavajuće slaganje, sa snimljenim stanjem na industrijskom objektu.

### 3. Scenario merenja

Postavljen je detaljan scenario merenja koji je obuhvatio merenja sledećih veličina:

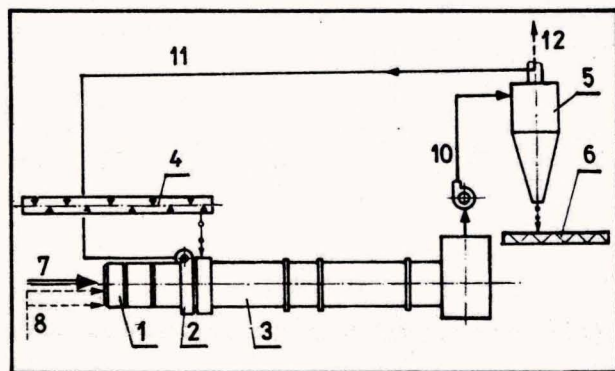
1. stanja okolnog vazduha,
2. temperature otpadnog gasa,
3. temperature predgrejanog primarnog vazduha, temperature površine plašta bubnja i recirkulacione cevi,
4. protok primarnog vazduha,
5. temperature suvog i vlažnog termometra otpadnog gasa,
6. temperature materijala na ulazu i izlazu iz sušare,
7. vlažnosti materijala na ulazu i izlazu iz sušare,
8. protoka otpadnog gasa koji se recirkuliše u dehidrator,
9. broja obrtaja bubnja dehidratora,
10. protoka materijala,
11. sastava produkata sagorevanja u komori za sagorevanje,
12. temperature agensa sušenja na ulazu u dehidrator,
13. temperature i protoka goriva.

Merenja navedenih veličina omogućila su detaljnu analizu rada dehidratora i snimanje postojećeg stanja. Uz prethodni termokinetički proračun dehidratora, moglo se pristupiti realizaciji prve faze rada na sniženju specifične potrošnje toplotne energije. Probni rezultati snimanja otkrili su značajno odstupanje rada dehidratora od projektovanog, pa su prema tome i rezerva za racionalniji rad bile velike. Ova konstatacija se odnosi pre svega na neusaglašenost rada komore za sagorevanje i dehidrator, neadekvatne protoke primarnog vazduha i goriva, neodgovarajući odnos recirkulisanog (otpadnog gasa) iz dehidratora i ukupne količine agensa sušenja na ulazu u dehidrator, nehomogenost strujnog i temperaturnog polja na ulazu u dehidrator – što ima za posledicu da su režimi sušenja daleko od optimalnih za definisani problem.

### 4. Energetska racionalizacija rada dehidratora

Prva faza rada na sniženju specifične potrošnje toplotne energije obuhvatila je intervencije na dehidratorskom postrojenju koje nisu zahtevale posebna ulaganja niti zastoje u sušenju rezanaca šećerne repe. Najbitniji zahvati su:

- intervencije na komori za sagorevanje (podešavanje rada gorionika detaljnim snimanjem sastava produkata sagorevanja po dužini i preseku komore za sagorevanje, podešavanje dužine plamena podešavanjem potpritisaka u komori za sagorevanje i merenjem i podešavanjem odnosa protoka goriva i svežeg predgrejanog vazduha

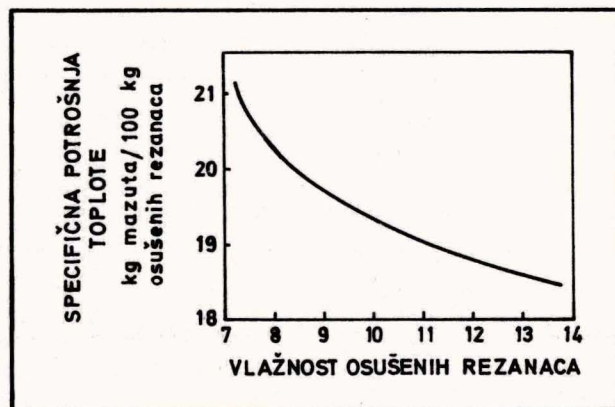


Slika 1. Shematski prikaz dehidratorskog postrojenja; 1. komora sagorevanja, 2. mešanje, 3. bubanj dehidratora, 4. sirovi reznac, 5. ciklon, 6. osušeni materijal, 7. gorivo, 8. okolni vazduh, 10. osušeni rezanci, 11. gas i materijal, 12. recirkulisani gas, 13. otpadni gas

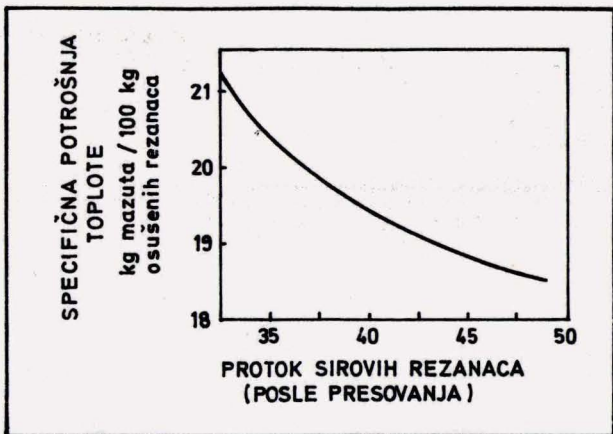
- koji se dovodi u komoru za sagorevanje);
- merenje i podešavanje protoka (u odnosu na ukupan protok agensa sušenja) recirkulisanog (otpadnog) gasa iz dehidratora;
- propisivanje povoljnijih režima sušenja (u odnosu na prethodno stanje), za dati ulaz;
- podešavanje krive sagorevanja, tj. količine svežeg vazduha, zavisno od pritiska u povratnom vodu mazuta (količine goriva);
- predlozi za bolje vođenje procesa (prilagođavanje režima sušenja sadržaju suve materije u sirovom rezancu, pažljivije vođenje procesa, tj. sušenje rezanaca do propisane vlažnosti, uz posebnu pažnju da ne dođe do presušavanja materijala).

Svi ovi zahvati doveli su do sniženja specifične potrošnje toplotne energije za maksimalno 19% (u odnosu na prosečnu potrošnju toplotne energije do momenta intervencije), a ukupno u proseku za dane posle merenja, analize i intervencije za 11,4% u šećerani I i za 14,9% u šećerani II. Minimalna specifična potrošnja toplotne energije je 18,4 kg mazuta/100 kg osušenih rezanaca šećerne repe. Prosečna specifična potrošnja toplotne energije u ispitivanom dehidratoru, pre intervencija na poboljšanju rada bila je 21,0 kg mazuta/100 kg osušenih rezanaca.

U daljem radu bilo je povremenih odstupanja objektivnog, ali i subjektivnog karaktera, tako da je povremeno dolazilo do znatnog prekoračenja specifične potrošnje toplotne energije čak i u odnosu na stanje pre intervencije. Nestabilan ulaz i složenost procesa, kao i navika rukovalaca, imali su za posledicu da je povremeno dolazilo do manjeg ili većeg presušivanja materijala, što je svakako izazvalo sniženje kapaciteta i povećanje specifične potrošnje toplotne energije (slika 2a), te pogoršanje sumarnih rezultata racionalizacije. Smanjenje kapaciteta dehidratora (ispod nominalnog) dovelo je do povećanja specifične potrošnje toplotne energije (slika 2b) i delimičnog presušivanja rezanaca. Maksimalna specifična potrošnja toplotne energije (posle intervencije) bila je 24,5 kg/100 kg osušenih rezanaca. Zahvaljujući preduzetim merama, izvesno je da je i količina osušenih rezanaca porasla (u odnosu na stanje pre intervencije), iako je teško utvrditi tačno kolika je to količina. Porast količine osušenih rezanaca postignut je smanjenjem iznošenja rezanaca iz bubnja dehidratora (ispravnim odnosom količina agensa sušenja i recirkulisanog gasa) i pravilnim podešavanjem sagorevanja u komori sagorevanja, odnosno propisivanjem dovoljnih količina primarnog vazduha da bi se proces u dehidratoru realizovao i da se koeficijent viška vazduha svede u propisane granice. Zatečeno stanje bilo je daleko od optimalnog jer su izmerene vrednosti koeficijenta viška vazduha (1,8–2,2) bile znatno iznad najpovoljnijih (1,3–1,6). Zbog lošeg sagorevanja registrovana je znatna koncentracija kancerogenih materija



Slika 2a. Zavisnost specifične potrošnje od vlažnosti osušenih rezanaca (% v.b.)



Slika 2b. Zavisnost specifične potrošnje toplote od protoka sirovih rezanaca (posle presovanja)

(NO<sub>x</sub>).

Manja je i količina osušenih rezanaca (sitne čestice), koje kod ovakvih sušara obavezno sagorevaju iz tri razloga:

- manje su brzine, pa je i manje vraćanje najsitnijih čestica u dehidrator;
- manja je ukupna količina vazduha, pa prema tome i znatno niža količina kiseonika u sušari;
- povećan je koeficijent recirkulacije u odnosu na zatečeno stanje, pa je i zbog toga smanjen udeo kiseonika u dehidratoru, a povećan udeo vodene pare.

## 5. Zaključak

Primenjeni model termokinetičkog proračuna procesa sušenja omogućava uzimanje u obzir svih relevantnih realnih

uslova odvijanja procesa sušenja u dehidratoru. Time je stvorena podloga za racionalizaciju rada dehidratora za sušenje rezanaca šećerne repe.

Na osnovu prethodnih merenja, utvrđeni su osnovni izvori odstupanja rada postrojenja od projektovanog. Preduzete su mere koje nisu zahtevale posebna ulaganja, niti zastoje u radu dehidratora.

Postignuti rezultati ukazuju na značajne mogućnosti sniženja specifične potrošnje toplotne energije, uz povećanje količine osušenih rezanaca i uz održavanje potrebnog kvaliteta posle peletiranja.

## Literatura

- [1] MIHAILOV, M. M.: *Voprosi suški topliva na elektro-stancijah*, Moskva, Leningrad, 1957
- [2] TIMOTIĆ, U. Đ., Nedeljkov, M. I.: *Termokinetički proračun dehidratora*, V savetovanje tehnologa sušenja i skladištenja, Topusko, 16-20. 1. 1989, 244-257.
- [3] TIMOTIĆ, U. Đ., Nedeljkov, M. I., Stakić, M., Janjić, D., Rac, N.: *Energetška racionalizacija rada dehidratora*, VI međunarodno savetovanje tehnologa sušenja i skladištenja, Tuheljske Toplice, 14-19. januar 1990, zbornik radova, str. 274-278.
- [4] NEDELJKOV, M. I., Timotić U. Đ., Stakić M. P.: *Racionalizacija rada dehidratora za sušenje rezanaca šećerne repe*, Prehramb. tehnol. biotehnol. rev., No 4, 1990
- [5] NEDELJKOV, M. I., Timotić U. Đ., Stakić M. P., BAŠIĆ Đ. S.: *Increase Energy Efficiency of Drum Dryer for Drying of Sugar Beet Noodles*, Trends in Agricultural Engineering, 15-19, September 1992.