

ZORANA LJ. ARSENIJEVIĆ¹
ŽELJKO B. GRBAVČIĆ²
RADMILA V.
GARIĆ-GRULOVIĆ¹

¹Institut za hemiju, tehnologiju
i metalurgiju, Beograd

²Tehnološko-metalurški
fakultet, Beograd

NAUČNI RAD

532.21:66.047:54-145.2:66.047.75

PERFORMANSE KONTINUALNE SUŠNICE SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA

U radu su prikazani rezultati istraživanja na pilot postrojenju za sušenje suspenzija i pasta nominalnog kapaciteta isparavanja 20 kg_{H₂O}/h, čiji je centralni deo cilindrična kolona prečnika 215 mm sa fluidizovanim slojem staklenih sfera. U radu su prikazani rezultati dobijeni pri tretmanu suspenzija cineb fungicida, bakar hidroksida, kalcijum karbonata, i čiste vode. Ispitivan je uticaj operativnih uslova na performanse sistema za sušenje i na kvalitet praškastog produkta. Izvršena je analiza efikasnosti sušenja i energetske efikasnosti u funkciji razlike temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha u cilju boljeg sagledavanja performansi sistema za sušenje sa energetskeg aspekta. Jednostavni bilansi prenosa mase i toplote adekvatno predviđaju radni režim sistema za sušenje u fluidizovanom sloju inertnog materijala.

Sušenje je veoma zastupljena operacija u hemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji i kao takva predstavlja značajni potrošač energije. Proces sušenja se intenzivno istražuju u svetu i kod nas u cilju povećanja energetske efikasnosti, povećanja intenzivnosti u cilju razvoja što kompaktnije opreme, poboljšanja kontrole u cilju održanja kvaliteta produkta i optimalnog kapaciteta i smanjenja emisije. Generalno, da bi proces sušenja bio efikasan a postrojenje racionalno i kompaktno, mora biti ispunjeno nekoliko uslova: a) potrebno je ostvariti visoke koeficijente prelaza mase i toplote, što je moguće postići samo ako postoji velika relativna brzina između agensa za sušenje i čestice (kapljice) koja se suši; b) potrebno je ostvariti veliku površinu kontakta; što je površina kontakta veća po jedinici volumena uređaja, to će za dati kapacitet postrojenje biti manje; c) potrebno je obezbediti visok specifičan unos agensa za sušenje; d) potrebno je obezbediti ravnomernu raspodelu temperature unutar uređaja i izbeći rizik lokalnog pregrevanja i eventualne termičke degradacije produkta; e) poželjno je raditi sa što koncentrovanim suspenzijama, na taj način što bi se deo vode uklonio mehaničkim operacijama (filtriranjem ili centrifugiranjem) i f) poželjno je raditi sa što većom razlikom temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sušionika. Pri praktičnoj realizaciji postrojenja, osnovni problem je što se većina napred navedenih uslova međusobno isključuje. Na primer, veliku kontaktnu površinu moguće je obezbediti boljim dispergovanjem suspenzije koja se suši u finije kapljice, ali to ima za posledicu nemogućnost ostvarivanja velike relativne brzine između agensa za sušenje i čestice

(kapljice). Istovremeno, povećanje koncentracije suve materije u suspenziji ograničava mogućnosti finog dispergovanja. S druge strane, povećavanje razlike temperatura praktično znači povećanje ulazne temperature vazduha, budući da je izlazna temperatura vazduha najčešće limitirana termičkom stabilnošću produkta. Međutim, što je veća ulazna temperatura vazduha to je rizik neravnomerne raspodele temperatura unutar uređaja veći.

Imajuću u vidu potrebu povećanja energetske efikasnosti sistema, kao i povećanja intenzivnosti u cilju razvoja što kompaktnije opreme i uslove koje treba da zadovolji efikasan sistem, u svetu i kod nas se sve više istražuje postupak sušenja na inertnim česticama u pokretnom sloju [1-3]. Smatra se da će ova tehnologija sušenja suspenzija i rastvora biti široko industrijski primenjena u narednim godinama [4].

SUŠENJE SUSPENZIJA NA INERTNIM ČESTICAMA U FLUIDIZOVANOM SLOJU

Postoji niz načina da se kontakt između čestica i fluida ostvari u pokretnom sloju, uz relativno kretanje i gasne i fluidne faze. Tipični sistemi su fluidizovani, fontanski i modifikovani fontanski slojevi. Sa aspekta uvećanja razmera procesa najjednostavniji je sistem sa fluidizovanim slojem.

Ako se fluidizacija pogodnih (inertnih) čestica vrši zagrejanim vazduhom, a u sloj uvodi suspenzija doći će do isparavanja vlage. Suspenzija se može uvoditi u sloj bilo raspršivanjem na gornju površinu, bilo ukapavanjem u sloj (slika 1).

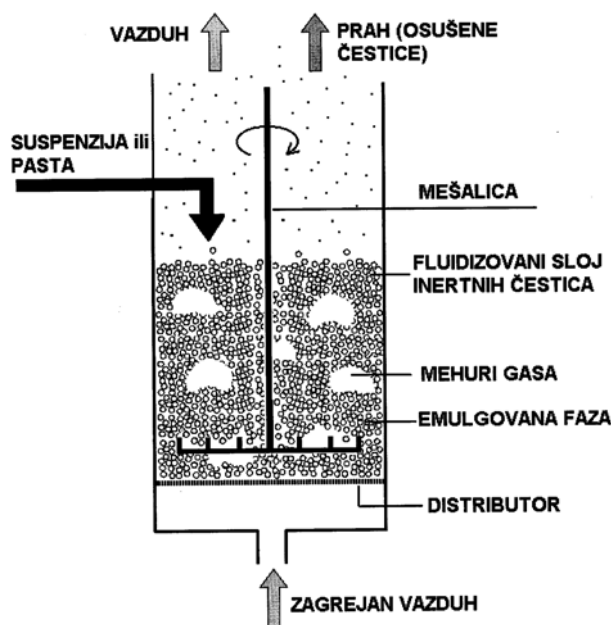
U osnovi, u fluidizovanom sloju teku simultano dva procesa: oblaganje dela inertnih čestica filmom suspenzije i istovremeno sušenje filma. Čestice u zoni nakapavanja bivaju obložene filmom suspenzije, a kako se čestice intenzivno kreću one brzo napuštaju mesto nakapavanja i ulaze u zonu sušenja. Kako koji sloj čestica iz filma suspenzije na staklenoj sferi biva osušen, prah gubi adhezivne veze sa ostatkom i biva

Adresa autora: Z.Lj. Arsenijević, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju-Centar za katalizu i hemijsko inženjerstvo, Karnegijeva 4, Beograd

E-mail: zorana@elab.tmf.bg.ac.yu

Rad primljen: Novembar 5, 2007.

Rad prihvaćen: Decembar 10, 2007.



Slika 1. Mehaniizam sušenja suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica

Figure 1. The drying mechanism in a fluidized bed of inert particles

strujom vazduha iznet iz sloja. Udeo vlažnih čestica u sloju je relativno mali, tako da ne postoji opasnost slepljivanja i blokiranja sloja. Zahvaljujući intenzivnom mešanju temperatura sloja je približno konstantna.

Kada se sušenje suspenzija odvija nanošenjem na inertne čestice u fluidizovanom sloju, poželjno je da su inertne čestice što približnijeg oblika, veoma uskog opsega prečnika i istih gustina. U praksi se za sušenje suspenzija najčešće koriste monodisperzni slojevi relativno krupnih sferičnih inertnih čestica prečnika od 1 do 3 mm [5,6]. U okviru ovog rada su kao inertne čestice korišćene monodisperzne staklene sfere. Ovakav izbor inertnih čestica obezbeđuje njihovu ravnomernu fluidizaciju, njihovo dobro mešanje, poželjnu kinetiku procesa i ravnomerno sušenje nanetog sloja suspenzije, i ujednačenost sadržaja vlage u sušenom materijalu.

Uloga inertnih čestica je dvojaka: a) pošto su relativno teške, za njihovu fluidizaciju potrebna je relativno velika brzina vazduha, ostvaruju se turbulenti uslovi, a sa tim i visoke vrednosti koeficijena prenosa toplote i mase i b) prisustvo inertnih sfera razvija površinu za razmenu toplote i mase.

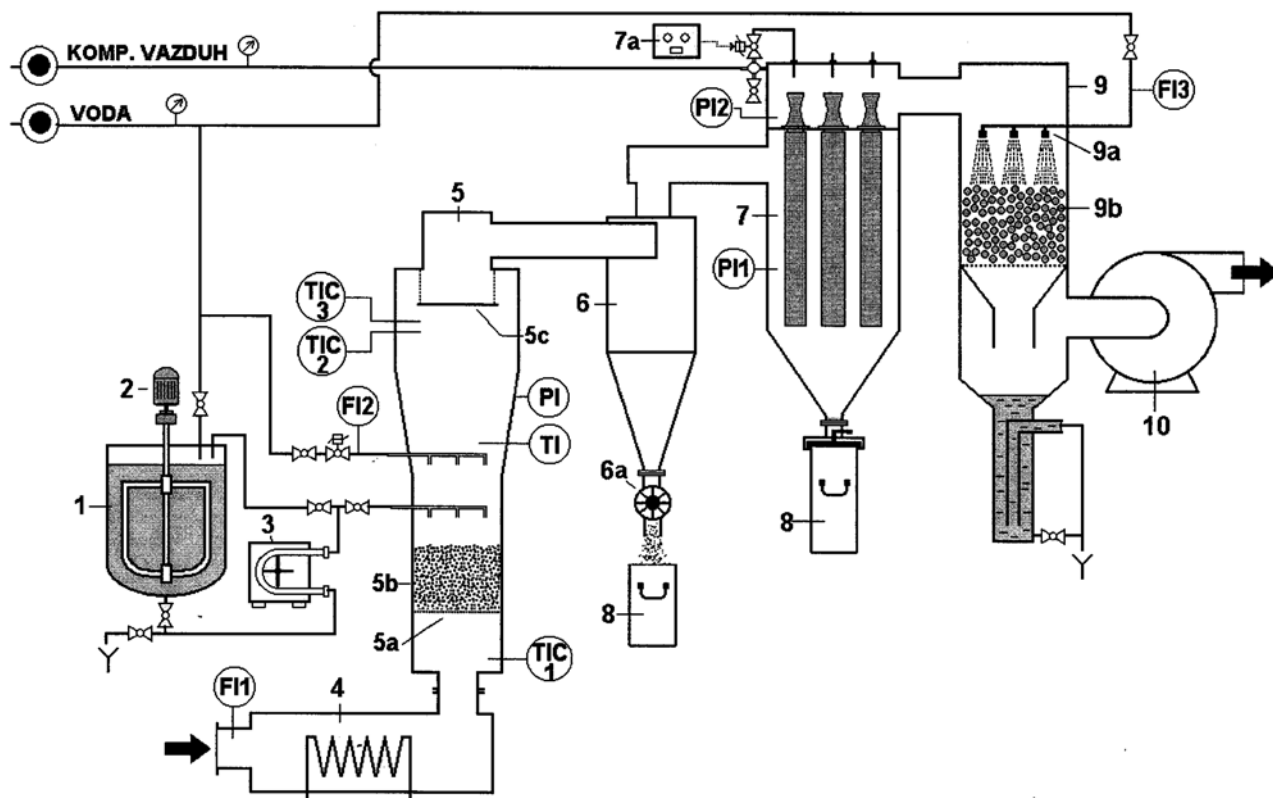
EKSPERIMENTALNI SISTEM

Poluindustrijski uređaj za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih staklenih sfera (slika 2) se sastoji od fluidizacione kolone (komore za sušenje), koja na dnu ima raspodeljivač vazduha i mrežu od nerđajućeg čelika. Fluidizaciona kolona je snabde-

vena mehaničkom mešalicom čija je uloga razbijanje eventualno stvorenih vlažnih agregata inertnih čestica i suspenzije. Vazduh iz ventilatora se zagreva pomoću električnog predgrejača koji je spregnut sa regulatorom temperature (TIC1). Suspenzija se iz rezervoara, koji je snabdeven mešalicom, pomoću peristaltičke pumpe direktno dozira u fluidizovani sloj. Sistem za doziranje je spregnut sa regulatorom temperature (TIC2) postavljenim na 0,7 m od dna kolone čime je omogućeno održavanje zadate izlazne temperature vazduha (T_{ge}). Izlazna temperatura gasa iz kolone je usvojena i kao temperatura "sušenja". Regulator temperature (TIC3), postavljen na istoj poziciji kao i TIC2, podešen je na vrednost koja je za 20 °C viša od zadate temperature sušenja i uloga TIC3 je da doziranjem tečne faze vode u sistem (zaštitni krug) spreči pregrevanje sloja usled eventualnih poremećaja u radu sistema za doziranje. Separacija osušenog produkta iz iskorišćenog vazduha se vrši u tri uzastopna uređaja: ciklonu, vrećastom filtru i skruberu. Skruber sa inertnim punjenjem je prvenstveno u ekološkoj funkciji jer pored uklanjanja najsitnijih čestica osušenog materijala dolazi i delimično do apsorpcije gasova (mirisa) u tečnosti skrubera (vodi). Iz šematskog prikaza na slici 2, uočava se da je ventilator postavljen na kraju procesne linije tako da ceo sistem radi pod vakuumom u odnosu na ambijetalni pritisak. Na ovaj način je sprečeno isticanje i vazduha i osušenog praškastog produkta iz postrojenja za sušenje, što doprinosi efikasnosti izvođenja procesa i ekološkoj zaštiti radnog okruženja.

Protok vazduha se meri pomoću prigušne ploče, a temperature ispred sloja, u sloju i iza sloja se mere digitalnim meračima temperature. Tokom eksperimenta ulazne i izlazne temperature su kontinualno registrovane pomoću računarskog sistema za automatsko prikupljanje i obradu podataka (akvizicioni sistem).

Komora za sušenje se sastoji od vertikalne cilindrične cevi prečnika, $D_c = 215$ mm i visine 300 mm, na koju se nastavlja konični deo prečnika 320 mm i gornji cilindrični deo visine 300 mm. Ukupna visina komore je 1200 mm, pri čemu efektivna visina, iznad raspodeljivača vazduha, iznosi 900 mm. Za formiranje fluidizovanog sloja korišćene su dve vrste monodisperznih sferičnih inertnih čestica: staklene sfere prečnika, $d_p = 0,93$ mm (gustina $\rho_p = 2640$ kg/m³) i $d_p = 1,94$ mm (gustina $\rho_p = 2460$ kg/m³). Relevantne karakteristike slojeva inertnih čestica su prikazane u tabeli 1. Površinska brzina vazduha (obračunata za sobnu temperaturu) je varirana od 0,96 do 2,45 m/s, temperatura ulaznog vazduha, T_{gi} je varirana između 121 i 430 °C, temperatura izlaznog vazduha, T_{ge} je održavana u intervalu od 43 do 128 °C, dok je razlika temperatura, $T_{gi} - T_{ge}$ pri navedenim uslovima iznosila od 47 do 317 °C. Sadržaj vlage u polaznom materijalu koji se suši (suspenziji) je varirao u granicama od 0,51 do 0,95 kg_{H₂O}/kg_{sus}.



Slika 2. Šematski prikaz uvećanog laboratorijskog (poluindustrijskog) sistema za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih čestica
 1 – rezervoar, 2 – mešalica, 3 – pumpa, 4 – grejač vazduha, 5 – fluidizaciona kolona, 5a – distributor, 5b – inertne čestice, 5c – deflektor, 6 – ciklon, 6a – rotacioni ventil, 7 – vrećasti filter, 7a – programator vrećastog filtera, 8 – prihvatni sudovi za produkt, 9 – skruber, 9a – mlaznica, 9b – punjenje, 10 – ventilator, FI – merač protoka, PI – indikator pritiska, TI – pokretni termopar, TIC – indikacija i kontrola temperature

Figure 2. Schematic diagram of the pilot system for suspensions drying in fluidized bed of inert particles

1 – tank, 2 – agitator, 3 – pump, 4 – air heater, 5 – fluidization column, 5a – distributor, 5b – inert particles, 5c – deflector, 6 – cyclone, 6a – rotary valve, 7 – bag filter 7a – bag filter programmer, 8 – product containers, 9 – scrubber, 9a – nozzle, 9b – packing, 10 – blower, FI – flowrate indicator, PI – pressure indicator, TI – movable temperature probe, TIC – temperature indication and control

Tabela 1. Karakteristike fluidizacione kolone ($D_c = 215$ mm) i slojeva inertnih čestica
 Table 1. Characteristics of fluidization column ($D_c = 215$ mm) and inert particles beds

Parametar	Simbol	Uvećani laboratorijski uređaj (poluindustrijski uređaj)			
Prečnik kolone, mm	D_c	215			
Prečnik inertnih čestica, mm	d_p	0,925		1,94	
Gustina inertnih čestica, kg/m^3	ρ_p	2640		2460	
Statička visina sloja, m	H_0	0,08	0,1	0,095	0,122
Masa sloja, kg	M_{sl}	4,53	5,75	5,3	6,79
Masa jedne inertne čestice, mg	m_p	1,094		9,4	
Broj čestica ($\times 10^6$), kom	N	4,14	5,26	5,99	7,22
Ukupna površina inertnih čestica, m^2	A_p	11,12	14,13	6,8	8,54
Minimalna brzina fluidizacije (20°C), m/s^*	U_{mF}	0,603		1,114	
Brzina odnošenja (20°C), m/s^{**}	U_l	7,92		11,07	
Pad pritiska u sloju, Pa	ΔP	1201	1501	1329	1707

* Određeno iz Ergun-ove jednačine [7]

** Određeno prema Kunii-u i Levenspiel-u [8]

U radu su prikazane dve serije oglada, u prvoj seriji je dozirana čista voda ("idealna suspenzija"), a u drugoj seriji sušene su suspenzije Cineba (polimer-cink etilen-bis-ditiokarbamat, $[\text{CH}_2\text{-NH-CS}_2]_2\text{-Zn}$), bakar-hidroksida ($\text{Cu}[\text{OH}]_2$) i kalcijum karbonata (CaCO_3). Staklene sfere prečnika 1,94 mm korišćene su u svim ogledima, osim nekoliko oglada sa suspenzijom Cineba gde su korišćene sitnije sfere. U ogledima u kojima je isparavana čista voda varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i protok vode. U ogledima u kojima su sušene suspenzije varirani su protok vazduha, ulazna temperatura vazduha i sadržaj vode u suspenziji. U svim ogledima određivan je sadržaj vlage i aktivne materije u dobijenom prahu, kao i granulometrijski sastav praha.

U ovom eksperimentalnom sistemu su uspešno sušeni i drugi materijali: fungicidi i pesticidi (Ziram, Propineb, Mangozeb, bakar oksihlorid, bakar oksisulfat, bordovska čorba), neorganska jedinjenja (kalcijum sulfat, kobalt karbonat, elektrolitički bakar, natrijum hlorid) i kompleksno jedinjenje organo bentonit.

MODELOVANJE PROCESA U SUŠNICI SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM INERTNIH ČESTICA

Za konvektivne sisteme sušenja na inertnim česticama veći broj autora pretpostavlja formiranje tankog uniformnog filma suspenzije na površini inertnih čestica, a s obzirom da inertne čestice u sloju obezbeđuju veliku površinu kontakta, procesi prenosa toplote i mase su brzi čak i kad je povećan sadržaj vlage u agensu za sušenje (atmosferskom vazduhu), s obzirom da se ovakav vazduh, usled načina izvođenja procesa, i dalje nalazi u stanju udaljenom od stanja termodinamičke ravnoteže sa kondenzatom vlage. Stoga se smatra da nema otpora difuziji vlage i prenosu toplote kroz film suspenzije i da se sušenje odvija u periodu "kvazi-konstantne" brzine sušenja. U tom periodu temperatura površine inertnih čestica ostaje približno konstantna i bliska je temperaturi adijabatskog zasićenja vazduha, T_{wb} , a sva dovedena toplota se koristi samo na isparavanje vlage [6-14]. Jedna od osnovnih pretpostavki je da je u fluidizovanom sloju ostvareno idealno mešanje, što znači da su sve inertne čestice u sloju na istoj temperaturi i da je isti sadržaj vlage u filmu suspenzije na površini inertnih čestica [10,12]. Iz ove pretpostavke proizlazi da procesom sušenja upravljaju samo spoljni prenos toplote i mase. Kao rezultat idealnog mešanja u sloju će biti uniformna raspodela i temperature i sadržaja vlage sušenog materijala. Ova pretpostavka se može delimično prihvatiti, s obzirom da je brzina sušenja vlažnog materijala koji se nalazi na površini inertne čestice sporija u odnosu na brzinu dispergovanja (mešanja) inertnih čestica u sloju [15].

Teorijski se kapacitet isparavanja vlage može odrediti iz konvencionalne jednačine brzine prenosa mase:

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = k_y A_p \Delta y_{lm} \quad (1)$$

ako se temperatura površine čestice može odrediti sa zadovoljavajućom tačnošću. U ovom izrazu k_y je koeficijent prenosa mase, A_p je ukupna površina inertnih čestica i Δy_{lm} je srednja logaritamska pogonska sila. Markowski [16] je dobio zadovoljavajuće slaganje eksperimentalnih podataka za sušenje suspenzije životinjske krvne plazme na inertnim česticama u "režimu brzog fontanovanja u plitkom sloju". Sledeći rad Lykov-a [17], Markowski [16] je koristio rešenje Fourier-ove jednačine za nestacionarni prenos toplote za predviđanje temperature na površini inertnih čestica, ukupnog koeficijenta prenosa toplote u sloju i predložio metodu za određivanje pogonske sile za spoljni prenos mase. Međutim, ovaj pristup se ne može tako jednostavno proširiti na sušnicu sa fluidizovanim slojem inertnih čestica. Ovaj pristup se može primeniti samo za rastvore i suspenzije gde se pretpostavka da je film uniformno raspodeljen po celokupnoj masi inertnih. U fluidizovanom sloju je, međutim, samo deo inertnih čestica obložen filmom suspenzije. S druge strane, ako je vlažan materijal u vidu paste, u sloju će egzistirati i vlažni agregati. Do sada još uvek ne postoji način da se u fluidizovanom sloju inertnih čestica odredi stvarno raspoloživa kontaktna površina.

Za svrhu projektovanja i simulacije sušenja mnogo jednostavniji pristup pri modelovanju je postavljanje ukupnog bilansa toplote za ceo sloj:

$$G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge}) = G_m C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + G_{\text{H}_2\text{O}} [C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w] + Q_g \quad (2)$$

gde su: G_v , G_m i $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – maseni protoci vlažnog vazduha, suve materije u suspenziji i vode u suspenziji na ulazu u sušnicu, C_{pg} , C_{pm} i C_{pw}^L – specifične toplote ovih komponenti, r_w – latentna toplota isparavanja vode, a Q_g – toplotni gubici. Kako je maseni protok suspenzije:

$$G_{\text{SUS}} = G_m + G_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3)$$

i ako je sadržaj vode u suspenziji definisan kao:

$$x_0 = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{G_{\text{SUS}}} \quad (4)$$

sledi da je

$$G_m = (1 - x_0) G_{\text{SUS}} = \frac{(1 - x_0)}{x_0} G_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5)$$

Kombinovanjem prethodnih jednačina dobija se izraz za određivanje kapaciteta isparavanja tečne faze vode:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge}) - Q_g}{[(1-x_0)/x_0] C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (6)$$

Ako se zanemare toplotni gubici, Q_g , jednačina (6) postaje:

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{A_c} = \frac{1}{A_c} \frac{G_v C_{pg} (T_{gi} - T_{ge})}{[(1-x_0)/x_0] C_{pm} (T_{ge} - T_{0A}) + C_{pw}^L (T_{ge} - T_{0A}) + r_w} \quad (7)$$

gde je: $W_{\text{H}_2\text{O}}$ – specifična brzina isparavanja tečne faze vode, a A_c – površina poprečnog preseka komore za sušenje neposredno iznad distributora vazduha.

Ostali relevantni parametri konvektivne sušnice su:

– specifična potrošnja vazduha:

$$SV = \frac{G_v}{G_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (8)$$

– specifični utrošci toplote

u odnosu na razliku ($T_{gi} - T_{0A}$):

$$g' = \frac{G_v \cdot C_{pg} \cdot (T_{gi} - T_{0A})}{G_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (9)$$

u odnosu na razliku ($T_{gi} - T_{ge}$):

$$g = \frac{G_v \cdot C_{pg} \cdot (T_{gi} - T_{ge})}{G_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (10)$$

REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Sušenje suspenzija je izvedeno kontinualno u poluindustrijskom sistemu. U svakom ogledu su podešavani protok vazduha i temperatura ulaznog vazduha (pomoću regulatora temperature TIC1, slika 2) na određenu vrednost. Proces doziranja suspenzije u sistem otpočinje onog momenta kada je temperatura izlaznog vazduha dostigla setovanu vrednost. U toku izvođenja procesa temperatura izlaznog vazduha je održavana na konstantnoj vrednosti, s obzirom da regulator temperature TIC2 (slika 2) kontroliše dinamiku doziranja suspenzije u sistem (doziranje se izvodi diskontinualno, tj. "on-off" regulacijom protoka). Stacionarni rad sistema se uspostavlja nekoliko minuta nakon što temperatura ulaznog vazduha dostigne zadatu vrednost (TIC1). Rad sistema za doziranje je podešen tako da je aktivni period doziranja sa "on-off" regulacijom protoka suspenzije iznosio 75% od ukupnog vremena doziranja.

Za pouzdan rad sistema ključna su tri parametra: brzina vazduha, ulazna temperatura vazduha i temperatura sušenja, tj. temperatura sloja. Brzina vazduha određena je uslovima fluidizacije inertnih čestica i fiksirana je. Temperatura sušenja određena je termičkom stabilnošću materijala koji se suši i željenom izlaznom rezidualnom vlagom praškastog produk-

ta. Za fiksiranu brzinu i ulaznu temperaturu vazduha, željena temperatura sušenja se održava kontrolom doziranja suspenzije materijala koji se suši.

Sistem za sušenje radi veoma stabilno, odnosno u toku sušenja variranja temperature izlaznog vazduha, ΔT_{ge} su manje od 2 °C.

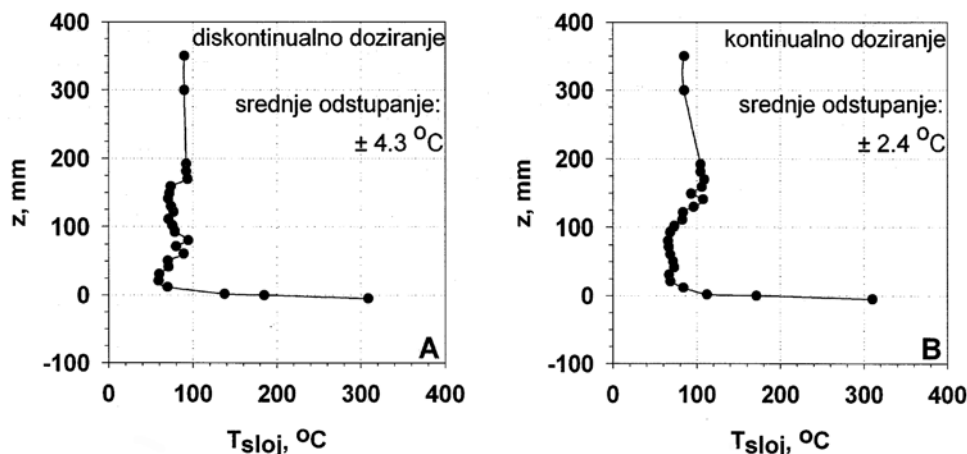
Za svaku od ispitivanih suspenzija određivan je sadržaj vode, gustina i raspodela veličine čestica. Izvršena je karakterizacija dobijenih praškastih produkata, odnosno određivana je rezidualna vlaga praha i raspodela veličine čestica. U ogledima sa suspenzijom Cineba dodatno je određivan i sadržaj aktivne materije pre sušenja, u polaznoj suspenziji, i nakon sušenja, u dobijenom suvom produktu. Generalno se oko 95% praha prikupi u ciklonu, a ostatak u vrećastom filtru. Ovo je u saglasnosti sa granulometrijskom analizom produkta, koji je praktično jednak granulometrijskom sastavu polazne suspenzije.

U ogledima u kojima je dozirana voda u sistem, maksimalno mogući protok vode (pri fiksiranom protoku vazduha i ulaznoj temperaturi vazduha) određivan je tako da ne ugrozi stabilnost rada. Uočeno je da temperatura sloja ne sme biti niža od 35 °C, jer se čestice slepljuju i formiraju se krupni vlažni agregati inertnih čestica koje otežano fluidizuju. U ogledima u kojima su sušene suspenzije Cineba i $\text{Cu}(\text{OH})_2$, temperatura sušenja (temperatura izlaznog vazduha) je određivana na osnovu zahtevanih karakteristika izlaznog suvog praha. Niska temperatura sušenja rezultuje u visokoj rezidualnoj vlazi produkta, dok visoka temperatura sušenja prouzrokuje smanjenje sadržaja aktivne materije.

Na slici 3a prikazan je karakterističan aksijalni profil temperatura u fluidizovanom sloju inertnih čestica pri sušenju vodene suspenzije CaCO_3 sa diskontinualnim načinom doziranja, tj. "on-off" regulacijom protoka suspenzije. U ovom slučaju su termoparovi bili postavljeni duž fluidizovanog sloja radijalno na 70 mm od zida kolone. Može se uočiti da temperatura sloja na vrlo kratkom rastojanju od raspodeljivača vazduha postaje približno konstantna u masi sloja. Vrednosti temperatura u sloju, prikazane na slici 3a, predstavljaju usrednjene vrednosti. Odstupanja od srednjih vrednosti su u granicama od $\pm 4,3$ °C. Ogled je ponovljen sa kontinualnim doziranjem suspenzije u sloj (slika 3b). Dobijeni su praktično isti rezultati kao i pri diskontinualnom doziranju sa "on-off" regulacijom protoka, s jedinom razlikom što su u ovom slučaju odstupanja od srednjih vrednosti manja, tj. $\pm 2,4$ °C.

U tabeli 2 prikazani su podaci za jedan tipičan ogled sušenja suspenzije Cineba u fluidizovanom sloju inertnog materijala.

Na slikama 4a i 4b prikazan je specifični kapacitet isparavanja vode (ogledi sa doziranjem tečne faze vode) obračunat po jedinici poprečnog preseka sloja ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$), u zavisnosti temperature sušenja, T_{ge} (slika 4a), i razlike temperatura, $T_{gi} - T_{ge}$ (slika 4b)



Slika 3. Aksijalni profili temperatura (suspenzija CaCO_3 , $G_{\text{sus}} = 35 \text{ kg/h}$, $x_0 = 0,7$, $T_{gi} = 308 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ge} = 96 \text{ }^\circ\text{C}$)

A – diskontinualno doziranje, B – kontinualno doziranje

Figure 3. Axial temperature variation (suspension CaCO_3 , $G_{\text{sus}} = 35 \text{ kg/h}$, $x_0 = 0,7$, $T_{gi} = 308 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ge} = 96 \text{ }^\circ\text{C}$)

A – discontinuous dosage, B – continuous dosage

Tabela 2. Tipičan ogled sušenja u fluidizovanom sloju inertnog materijala (suspenzija Cineb fungicida, $x_0 = 0,70 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$, inertne čestice $d_p = 0,93 \text{ mm}$)

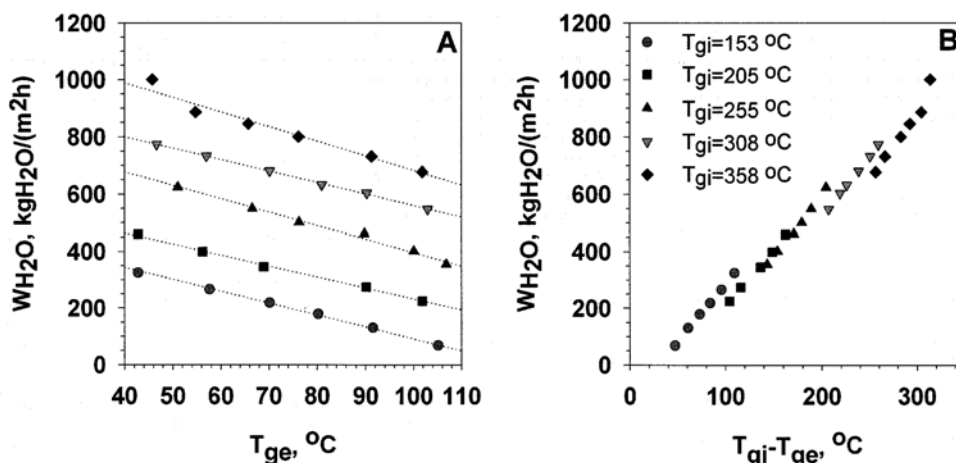
Table 2. Typical drying run in fluidized bed of inert particles (suspension Zineb fungicide, $x_0 = 0.70 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$, inert particles $d_p = 0.93 \text{ mm}$)

Zapreminski protok vazduha ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), m^3/h	V_0	270
Površinska brzina vazduha ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), m/s	U_0	2,07
Ulazna temperatura vazduha, $^\circ\text{C}$	T_{gi}	195
Izlazna temperatura vazduha, $^\circ\text{C}$	T_{ge}	67
Protok suspenzije, $\text{kg}_{\text{sus}}/\text{h}$	G_{sus}	25,48
Ekspanzija sloja, odnos dinamičke visine sloja/statičke visine sloja		2,50
Protok vode (u suspenziji), $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$	$G_{\text{H}_2\text{O}}$	17,84
Protok suve materije (u suspenziji), $\text{kg}_{\text{dm}}/\text{h}$	G_m	7,64
Specifična isparljivost, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$	$W_{\text{H}_2\text{O}}$	491
Specifična potrošnja vazduha, $\text{kg}_{\text{vazd.}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	SV	18,25
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{gi} - T_{ge}$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	q	2357
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{gi} - T_{0A}$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	q'	3315
Vlažnost produkta, %	x_f	0,78

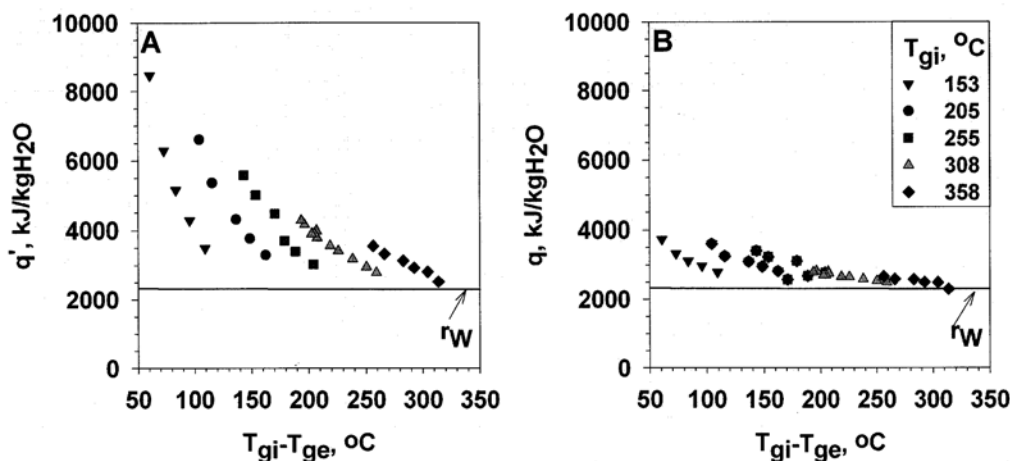
pri konstantnim temperaturama ulaznog vazduha, T_{gi} i konstantnoj površinskoj brzini vazduha, $U_0 = 1,77 \text{ m/s}$. Sa slika se uočava da kapacitet isparavanja vode može biti veoma visok, i do $1000 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$. Zahvaljujući intenzivnom mešanju inertnih čestica u sloju, izlazna temperatura vazduha je praktično jednaka temperaturi sloja, što je generalna karakteristika agregativno fluidizovanih sistema. Može se uočiti da je kapacitet isparavanja vode pri konstantnoj brzini vazduha, direktno proporcionalan razlici temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja, $T_{gi} - T_{ge}$.

Na slikama 5a i 5b prikazan je specifični utrošak toplote pri isparavanju vode u funkciji razlike temperatura, $T_{gi} - T_{ge}$. Utrošak toplote je obračunat na dva načina: kao utrošak na stvarnu pogonsku silu (vrednost označena sa q), tj. utrošak obračunat na razliku temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha, $T_{gi} - T_{ge}$ (slika 5b), i kao utrošak u odnosu na stvarno unetu količinu toplote (vrednost označena sa q'), tj. utrošak obračunat na stvarnu razliku temperatura, $T_{gi} - T_{0A}$ (slika 5a), gde je T_{0A} – temperatura okoline. Realni utrošak toplote veći je od q' za faktor efikasnosti generatora toplote. Specifični utrošak toplote, q je približno konstantan, tj. nezavisan od ulazne temperature vazduha, T_{gi} i od protoka vode, $G_{\text{H}_2\text{O}}$ i neznatno je iznad latentne toplote isparavanja vode, r_w . Stvarni utrošak toplote, q' veoma zavisi od načina izvođenja procesa. Kao što se vidi sa slike, stvarna specifična potrošnja toplote se smanjuje sa povećanjem razlike temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$, odnosno povećanjem pogonske sile. Istovremeno pri višim ulaznim temperaturama vazduha specifična potrošnja toplote je manja. Utrošak toplote je najveći pri najmanjem $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$, a asimptotski se približava teorijskom utrošku sa porastom $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$. Budući da je realno korišćenje energije srazmerno razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha, $T_{gi} - T_{ge}$, podaci na ovoj slici sugerišu zaključak da je sušnica sa fluidizovanim slojem utoliko termički efikasnija ukoliko se proces izvodi pri većoj razlici temperatura između ulaznog i izlaznog vazduha.

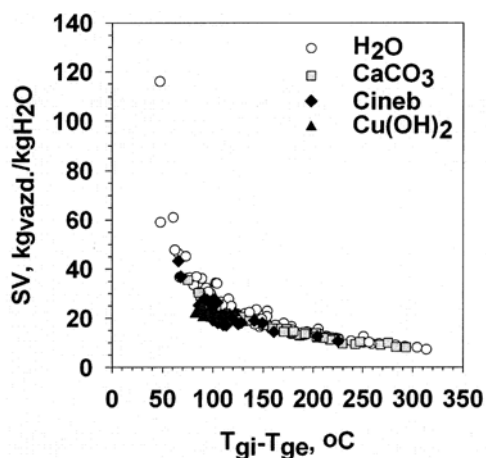
Specifični utrošak vazduha pri doziranju tečne faze vode je, takođe, manji što je razlika temperatura, $T_{gi} - T_{ge}$ veća (slika 6). Kada su ostvareni uslovi za ravnomerno sušenje i isparavanje vlage iz materijala koji se suši, što je niža temperatura vazduha na izlazu iz sušnice to je veće energijsko iskorišćenje rada su-



Slika 4. Specifična brzina isparavanja vode (doziranje tečne faze vode, $U_0 = 1,77$ m/s, inertne čestice, $d_p = 1,94$ mm)
 A – zavisnost od temperature sušenja, T_{ge} B – zavisnost od razlike temperatura, $T_{gi} - T_{ge}$
 Figure 4. Specific rate of water evaporation (feed – water, $U_0 = 1,77$ m/s, inert particles, $d_p = 1,94$ mm)
 A – function of drying temperature, T_{ge} B – function of temperature difference, $T_{gi} - T_{ge}$



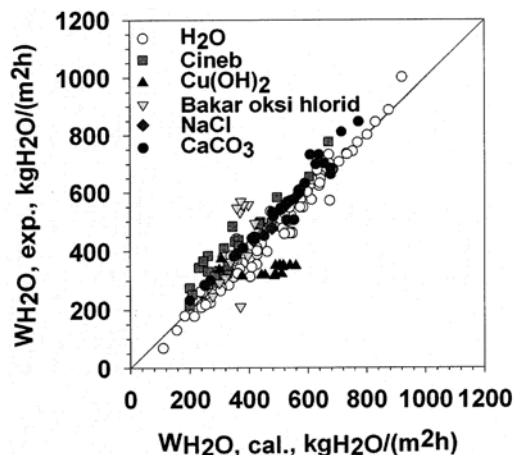
Slika 5. Specifična potrošnja toplote (doziranje tečne faze vode)
 A – obračunat na razliku temperatura $T_{gi} - T_{0\Delta}$, B – obračunat na razliku temperatura $T_{gi} - T_{ge}$
 Figure 5. Specific heat consumption (feed – water)
 A – calculated on the basis of temperature difference $T_{gi} - T_{0\Delta}$, B – calculated on the basis of temperature difference $T_{gi} - T_{ge}$



Slika 6. Specifična potrošnja vazduha
 Figure 6. Specific air consumption

šnice i manja potrošnja agensa za sušenje. Sa slike 6 se uočava da podaci slede istu liniju.

Na slici 7 je prikazano poređenje eksperimentalnih podataka sa vrednostima W_{H_2O} dobijenim iz proračuna korišćenjem procenjene vrednosti za specifični toplotni kapacitet suve materije $C_{pm} \approx 0,85$ kJ/kg °C. Srednje apsolutno odstupanje između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti iznosi 5,8%, pri čemu su za 85% podataka odstupanja u intervalu od $\pm 10\%$. Sa slike se može uočiti da je veće odstupanje eksperimentalnih od izračunatih vrednosti u slučaju suspenzija, naročito za suspenzije $Cu(OH)_2$ i bakar(II)-oksi-hlorid. S obzirom da su proračunom obuhvaćeni aproksimativno procenjeni gubici toplote u okolinu, razlike između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti potiču najverovatnije usled nemogu-



Slika 7. Poređenje eksperimentalnih i izračunatih vrednosti specifične brzine isparavanja vode

Figure 7. Comparison of the experimental and calculated values of the specific rate of water evaporation

čnosti održavanja apsolutno konstantnog protoka suspenzije i apsolutno konstantne i temperature i protoka ulaznog vazduha. Takođe, moguće je da u svim ogleđima nisu u potpunosti bili uspostavljeni stacionarni uslovi.

Generalno, specifični kapaciteti isparavanja vode ostvareni u poluindustrijskoj sušnici sa fluidizovanim slojem inertnih čestica su vrlo visoki i iznose od 69 do 1000 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ (pri doziranju tečne faze vode) i od 212 do 896 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ (pri sušenju različitih suspenzija), zavisno od uslova ogleđda. U odnosu na vrednosti od 34–86 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$ [18] dobijene pri sušenju sojinog mleka na teflonskim česticama u vibrofluidizovanom sloju ($H/D_c = 0,7$), pri sličnim usloviima ($T_{gi} \approx 150\text{ }^\circ\text{C}$) pri doziranju tečne faze vode u našem sistemu ($H/D_c = 0,5$) postignut je veći kapacitet isparavanja vode od 295 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$.

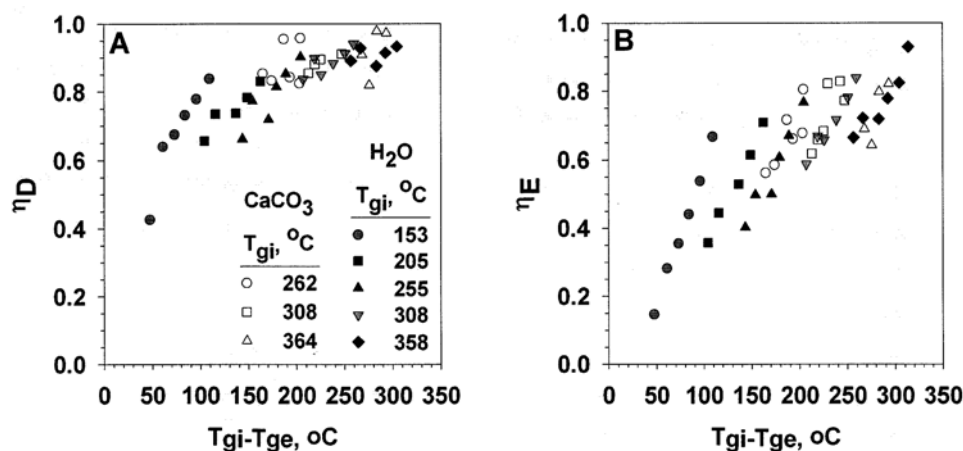
Uspešnost rada sušnice i radni režim u kom se odvija sušenje opisuju se pomoću različitih parametara kao što su volumetrijska brzina isparavanja vlage, gubici toplote u okolinu, specifična potrošnja toplote i termička (energijska) efikasnost. U tehničkoj literaturi se često sreće parametar termičke efikasnosti, koji povezuje količinu toplote iskorišćene za sušenje vlažnog materijala u sušnici sa ukupnom toplotom dovedenom u sušnicu, koja je obračunata u odnosu na temperaturu površine inertnih čestica (η'_T) [16] ili u odnosu na temperaturu okoline (η_T) [18] i definisana je sledećom jednačinom:

$$\eta'_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_p)}, \text{ ili } \eta_T = \frac{(T_{gi} - T_{ge})}{(T_{gi} - T_{0A})} \quad (11)$$

Energijska efikasnost sistema se može opisati na različite načine. Generalno, bez obzira na definiciju efikasnosti, pri konvektivnom sušenju sa jednim prolazom agensa za sušenje (vazduha) kroz vlažni materijal, visoke efikasnosti se postižu na račun visoke temperature ulaznog vazduha i ostvarivanja uslova pri kojima je izlazni vazduh što je moguće bliži stanju zasićenja. Energijska efikasnost u principu obuhvata kumulativne efekte.

Kudra [19] je predložio simultanu analizu lokalne (trenutne) i kumulativne efikasnosti sušenja i energijske efikasnosti u cilju boljeg sagledavanja performansi sušnice i optimizacije uređaja i procesa sa aspekta iskorišćenja energije. Energijska efikasnost, η_E i efikasnost sušenja, η_D su definisane i adaptirane za naš sistem preko sledećih izraza:

$$\eta_E = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O,exp}} r_w(\text{na } T_{ge})}{G_v C_{pg}(\text{na } T_{ge}) (T_{gi} - T_{0A})} \quad (12)$$



Slika 8. Zavisnost efikasnosti sušenja, A i energijske efikasnosti, B od razlike temperature

Figure 8. Drying, A and energy, B efficiency as a function of temperature difference

$$\eta_D = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije} - \text{Izlaz energije}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O,exp}} r_w (\text{na } T_{ge})}{G_v C_{pg} (\text{na } T_{ge}) (T_{gi} - T_{ge})} \quad (13)$$

pri čemu je: $\eta_T = \frac{\eta_E}{\eta_D}$

Efikasnost sušenja, η_D i energijska efikasnost, η_E , koje su originalno povezane sa sadržajem vlage u materijalu [19], u okviru ove analize su usvojene i adaptirane da bi se utvrdila njihova zavisnost od razlike temperatura vazduha na ulazu i izlazu iz sušnice, $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$ (slike 8a i b). Adaptacija je izvršena u smislu usrednjavanja vrednosti efikasnosti sušenja, η_D i energijske efikasnosti, η_E za ulazne i izlazne uslove procesa (jednačine (12) i (13)).

U svim oglecima u kojima je radeno sa doziranjem tečne faze vode efikasnost sušenja, η_D je varirala od 0,46 do 0,95, a vrednost energijske efikasnosti, η_E se kretala od 0,14 do 0,90, u zavisnosti od temperature ulaznog vazduha. Visoke vrednosti za η_D i η_E odnose se na oglede u kojima je temperatura izlaznog vazduha bila neznatno viša (nekoliko stepeni) od temperature adijabatskog zasićenja vazduha, što znači da je krajnji sadržaj vlage u vazduhu blizak maksimalnoj vrednosti, pri čemu je izlazni vazduh i dalje u nezasićenom stanju. U procesu sušenja CaCO_3 suspenzija, vrednost η_D je varirala između 0,75 i 0,95, a vrednost η_E između 0,53 i 0,75. Usrednjene vrednosti za η_D i η_E veoma su korisne sa aspekta poređenja različitih tipova sušnica. Razmatrajući samo podatke za sušenje vodene suspenzije CaCO_3 , proizlazi da su vrednosti za η_D i η_E relativno visoke u poređenju sa drugim sistemima za sušenje suspenzija [6,19]. Ovo ukazuje na dobre performanse tehnologija zasnovanih na sušenju suspenzija nanošenjem na inertne čestice. Naime, raspršavanjem i nanošenjem suspenzije materijala koji se suši na inertne čestice u vidu tankog tečnog filma moguće je ostvariti veliku koncentraciju sušenog materijala u raspoloživoj zapremini sušnice. I povećanje površine za razmenu i povećanje koncentracije čestica sušenog materijala vode ka intenzifikaciji procesa u sušnici i povećanoj efikasnosti korišćenja energije, tj. povećan je efekat isparavanja vlage u odnosu na sisteme za sušenje bez inertnih čestica.

Efikasnost sušnice sa fluidizovanim slojem inertnih čestica može se ilustrovati podatkom da je tipični specifični kapacitet isparavanja vode kod komercijalnih sprej sušnica u proseku 5–25 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$, a kod sušnica sa fluidizovanim slojem inertnih čestica i do 1000 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$. Jedino su po kapacitetu isparavanja vode kompetitivne klasične pneumatske sušnice bez inertnih čestica (250–1250 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{m}^2\text{h})$), pri čemu

treba imati u vidu da se uglavnom koriste za sušenje vlažnih prahova [20].

Termička efikasnost, η_T obračunata u odnosu na temperaturu okoline, T_{0A} prema jednačini (11) u našem sistemu se za sve izvedene oglede kreće u intervalu od 0,911 do 0,344. U odnosu na vrednost termičke efikasnosti od $\eta_T \approx 0,3$ dobijenu pri sušenju sojinog mleka u vibrofluidizovanom sloju inertnih čestica [18], za slične operativne uslove ($T_{gi} \approx 150^\circ\text{C}$) u oglecima sa doziranjem tečne faze vode u našem laboratorijskom sistemu je postignuta vrednost od $\eta_T \approx 0,25$ –0,48, a u poluindustrijskom sistemu $\eta_T \approx 0,56$.

Osnovni nedostatak predstavljenog sistema je pojava sinterovanja (slepljivanja) inertnih čestica pri sušenju nekih materijala i uspostavljanje ekstremnih operativnih uslova, tj. promena brzine doziranja suspenzije [21] ili izlazne temperature vazduha usled čega dolazi do naglog porasta sadržaja vlage. Posledica toga je neravnomerna raspodela temperature, njen nagli porast i paljenje sloja. Nastali krupni aglomerati remete hidrodinamiku sistema. Primena fluidizovanog sloja u sušenju materijala koji sadrže neku lepljivu komponentu je praktično nemoguća s obzirom da lepljivost tih materijala vodi ka nestabilnosti procesa, osim u slučajevima gde se dodaju razni aditivi [22] koji smanjuju adhezivnost.

Sušenje nekoliko organskih i bioloških materijala (kalcijum stearat, vinska kiselina, pivski kvasac, sojino mleko, lipozomi, paradajz sok, sveža jaja, skrob) bile su neuspešne u našem sistemu. U ovim probama je došlo do kanaliziranja kroz sloj posle svega nekoliko minuta, pri čemu vreo ulazni vazduh dospeva direktno do regulatora temperature TIC2, koji je spregnut sa sistemom za doziranje materijala. Posledica ovoga je "plavljenje" sloja sa suspenzijom i prestanka fluidizacije nakon vrlo kratkog vremena. Usled navedenih nedostataka sistema, sušenje svakog potencijalnog preparata se mora testirati na laboratorijskom nivou. Takođe, važno je napomenuti da u nekim slučajevima nije dovoljno kratkotrajno testiranje za donošenje verodostojnih zaključaka. Na primer, sušenje formulisanih preparata na bazi cineba i $\text{Cu}(\text{OH})_2$ nije uspeo. U pitanju su preparati kojima su dodavani razni aditivi (dispersanti, okvašivači, punioci, itd.). U slučaju formulisane Cineb suspenzije posle 6 h rada zapaženi su prvi simptomi nestabilnog rada sistema, najverovatnije usled kumulativnog efekta.

Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati da sistem radi stabilno i da ga karakteriše visoka efikasnost. Specifična isparljivost je vrlo visoka od 69 do 1000 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2$ sloja pri doziranju vode i od 212 do 896 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2$ sloja pri sušenju suspenzija, zavisno od uslova pod kojim su izvođeni ogleci. Iskorišćenje energijskog potencijala vazduha je, takođe, vrlo viso-

ko. Vlažnost vazduha se na putu kroz sloj povećava od 4 do 11 puta, zavisno od uslova ogleda. Visoka efikasnost u pogledu specifičnog utroška toplote, q i specifičnog utroška vazduha, SV potiče od visoke razlike temperatura između ulaznog vazduha i sloja, $T_{gi} - T_{ge}$, pri čemu se temperatura sloja održava na zahtevanoj vrednosti. U svim ogledima sušenja suspenzija, vlažnost dobijenog praha, kao i sadržaj aktivne materije uglavnom su bili u zadovoljavajućim granicama. Produkt se dobija u vidu suvog tečljivog praha za razliku od tunelskih sušnica gde se dobija u vidu suvog kolača, koji se u zavisnosti od vrste materijala spontano ili uz utrošak dopunske energije dezintegriše. Pored toga, granulometrijski sastav produkta je nešto niži od granulometrijskog sastava polazne suspenzije. Na ovaj način u daljem tehnološkom procesu najčešće nije potrebno obavljati operaciju mlevenja.

Industrijski prototip, koji je realizovan na osnovu istraživanja prikazanih u ovom radu nalazi se u eksploataciji od marta 2003. godine, u potpunosti je u skladu sa predviđenim procesnim parametrima. Centralni deo sistema je fluidizaciona kolona prečnika 800 mm. Pri ulaznoj temperaturi vazduha od 292 °C, temperaturi sušenja od 105 °C i protoku vazduha od 2,12 m³_N/s ostvaruje se kapacitet od 8,05 t suve materije za 24 h, polazeći od suspenzije sa 65% H₂O. Može se uočiti da jedan relativno mali fluidizacioni uređaj zamenjuje veoma veliku komoru za sušenje. Efektivna površina fluidizacione kolone je oko 700 puta manja od potrebne površine tava za sušenje za isti kapacitet. Ostvarena je ušteda energije za sušenje od najmanje 50% u odnosu na raniju tehnologiju sušenja, što je ekvivalentno uštedi od oko 825 m³_N prirodnog gasa dnevno. Ukupni ekonomski efekti, pored uštede u energiji za sam proces sušenja, uključuju i uštedu aktivne materije, eliminaciju troškova energije za mlevenje produkta, a potreban je i znatno manji broj rukovaoca usled automatskog rada postrojenja.

ZAKLJUČCI

Sušenje rastvora i suspenzija u fluidizovanom sloju inertnog materijala predstavlja vrlo atraktivnu alternativu sprej sušionicima, kao i klasičnim tehnologijama sušenja suspenzija u tavama. U ovom sistemu moguće je ostvariti višestruko veći specifični kapacitet, a time znatno manje investicione troškove. U odnosu na sprej sušionik fluidizacioni sistem je jednostavnije konstrukcije i omogućuje jednostavniju kontrolu procesa.

Sistem radi stabilno i karakteriše ga visoka efikasnost. Specifična isparljivost je vrlo visoka i ključ visoke efikasnosti u pogledu specifičnog utroška toplote i specifičnog utroška vazduha je u velikoj razlici temperatura između ulaznog vazduha i sloja, pri čemu se temperatura sloja održava na željenoj vrednosti. Zahvaljujući intenzivnom mešanju čestica temperatura sloja je približno ravnomerna. Utrošak toplote, obračunat na razliku $T_{gi} - T_{ge}$, je blizu teorijski potrebnog za faznu transformaciju vode tečnost-gas, tj. kreće se oko vrednosti latentne toplote isparavanja. Sušenje u fluidizovanom sloju inertnog materijala je najefikasnije, u poređenju sa drugim mogućim sistemima sa pokretnim slojem inertnog materijala, ali je ograničeno na materijale koji nisu lepljivi tj. koji neće prouzrokovati sinterovanje sloja.

mu se temperatura sloja održava na željenoj vrednosti. Zahvaljujući intenzivnom mešanju čestica temperatura sloja je približno ravnomerna. Utrošak toplote, obračunat na razliku $T_{gi} - T_{ge}$, je blizu teorijski potrebnog za faznu transformaciju vode tečnost-gas, tj. kreće se oko vrednosti latentne toplote isparavanja. Sušenje u fluidizovanom sloju inertnog materijala je najefikasnije, u poređenju sa drugim mogućim sistemima sa pokretnim slojem inertnog materijala, ali je ograničeno na materijale koji nisu lepljivi tj. koji neće prouzrokovati sinterovanje sloja.

SPISAK SIMBOLA

A_c	– površina poprečnog preseka kolone neposredno iznad ploče distributora vazduha, m ²
A_p	– površina inertnih čestica, m ²
C_{pg}	– specifični toplotni kapacitet gasa ili nezasićenog vlažnog vazduha, kJ/(kg K)
C_{pm}	– specifični toplotni kapacitet čestica iz suspenzije, kJ/(kg K)
C_{pw}^L	– specifični toplotni kapacitet vode u tečnoj fazi, kJ/(kg K)
D_c	– prečnik kolone, m
d_p	– prečnik inertne čestice (volumetrijski), m
G_{H_2O}	– maseni protok vode na ulazu u kolonu, kg/s
G_m	– maseni protok suve materije u koloni, kg/s
G_{sus}	– maseni protok suspenzije, kg/s
G_v	– maseni protok vlažnog vazduha na ulazu u kolonu, kg/s
H_0	– statička visina sloja inertnih čestica u fluidizovanom sloju, m
H	– dinamička visina sloja inertnih čestica u fluidizovanom sloju, m
k_y	– koeficijent prenosa mase u jednačini (1), kg/m ² s
M_{sl}	– masa inertnih čestica u sloju, kg
ΔP	– pad pritiska sloja, Pa
q	– specifična potrošnja toplote, bazirana na $T_{gi} - T_{ge}$, kJ/kg _{H₂O}
q'	– specifična potrošnja toplote, bazirana na $T_{gi} - T_{04}$, kJ/kg _{H₂O}
Q_g	– gubici toplote prirodnom konvekcijom i zračenjem, kJ/s
r_w	– latentna toplota isparavanja vode, kJ/kg
SV	– specifična potrošnja vazduha [G_v/G_{H_2O}], kg _{vazd} /kg _{H₂O}
T_{04}	– temperatura okoline, °C
T_{ge}	– temperatura vazduha na izlazu iz kolone, °C
T_{gi}	– temperatura vazduha na ulazu u kolonu, °C
T_p	– temperatura inertnih čestica, °C
U_0	– površinska brzina vazduha kroz ploču distributora (na T_{04}), m/s
U_{mF}	– površinska brzina fluida u stanju minimalne fluidizacije, m/s

- U_t – brzina taloženja (odnošenja) usamljene čestice u neo-graničenom medijumu, m/s
- V_0 – zapreminski protok vazduha na ulazu u kolonu (na T_{04}), m^3/s
- W_{H_2O} – specifična brzina isparavanja vode [$W_{H_2O} = G_{H_2O}/A_c$], kg/m^2s
- x_0 – sadržaj vode u suspenziji, kg_{H_2O}/kg_{sus}
- x_f – rezidualni sadržaj vlage u produktu, %
- y – maseni udeo vode u gasnoj fazi (apsolutna vlažnost vazduha), $kg_{H_2O}/kg_{suw\ vazd.}$
- z – vertikalna koordinata, m

Grčki simboli

- η_D – efikasnost sušenja
- η_E – energetska efikasnost
- η_T – termička efikasnost u odnosu na T_{04}
- η'_T – termička efikasnost u odnosu na T_p
- ρ_p – gustina inertnih čestica, kg/m^3

LITERATURA

- [1] P. Romankov, In: Fluidization, J. Davidson and D. Harrison, (Eds.), Academic Press, London, 1971, 569–598.
- [2] D. Povrenovic, Z. Grbavcic, Dz. Hadzismajlovic, D. Vukovic and H. Littman, Fluid–mechanical and thermal characteristics of spout–fluid bed drier with draft tube, DRYING'91, Elsevier, Amsterdam, CA 117, 1991, 343–351.
- [3] Dz. Hadzismajlovic, D. Povrenovic, Z. Grbavcic, D. Vukovic and H. Littman, In: Fluidization VI, J. Grace, L. Shemilt and M. Bergougnou 8Eds.), Engineering Foundation, New York, 1989, 277–283.
- [4] A. Mujumdar, Research and development in drying: recent trends and future prospects, Drying Technol. **22** (2004) 1–26.
- [5] T. Kudra, A.S. Mujumdar, Special drying technologies and novel dryers, In: Handbook of Industrial Drying, 2nd ed., A.S., Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, New York, 1995, 1087–1149.
- [6] T. Kudra, A.S. Mujumdar, Advanced drying technologies, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [7] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog. **48** (1952) 89–94.
- [8] D. Kumii, O. Levenspiel, Fluidization engineering, J. Wiley, New York, 1969.
- [9] D.H. Lee, S.D. Kim, Drying characteristics of starch in an inert medium fluidized bed, Chem. Eng. Technol. **16** (1993) 263–269.
- [10] D.H. Lee, S.D. Kim, Mathematical model for batch drying in an inert medium fluidized bed, Chem. Eng. Technol. **22** (1999) 443–450.
- [11] T. Szentmarjay, A. Szalay, E. Pallai, T. Bencze, J. Vass, Control of drying process in mechanically spouted bed dryer, Drying Technol. **14** (1996) 501–512.
- [12] P.J.A.M. Kerkhof, Some modeling aspects of (batch) fluid–bed drying of life–science products, Chem. Eng. Process. **39** (2000) 69–80.
- [13] A.I. Leontieva, K.V. Bryankin, V.I. Konovalov, N.P. Utrobin, Heat and mass transfer during drying of a liquid film from the surface of a single inert particle, Drying Technol. **20** (2002) 729–747.
- [14] V.E. Kutsakova, Drying of liquid and pasty products in a modified spouted bed of inert particles, Drying technol. **22** (2004) 2343–2350.
- [15] M. Trojosky, L. Morl, P. Wnukowski, F. Setterwall, Iterative calculation of the wetted part of the particle surface and of the liquid concentration profile in liquid–sprayed gas–fluidized beds, Proceedings of 5th Int. Symp. on Agglomeration, M. Cross, R. Oliver (Eds.), Inst. Chem. Eng., Rugby UK, 1989, 553–567.
- [16] A.S. Markowski, Drying characteristics in a jet–spouted bed dryer, Can. J. Chem. Eng. **70** (1992) 938–944.
- [17] A.V. Lykov, Theory of heat conduction, Academy in Moscow, Moscow, 1967. (in Russian)
- [18] Y.K. Pan, J.G. Li, L.J. Zhao, W.H. Ye, A.S. Mujumdar, T. Kudra, Performance characteristics of the vibrated fluid bed of inert particles for drying of liquid feeds, Drying Technol. **19** (2001) 2003–2018.
- [19] T. Kudra, Instantaneous dryer indices for energy performance analysis, Inzynieria Chemiczna i Procesowa (Inz. Chem. Procesowa) **19** (1998) 163–172.
- [20] AVP Dryer Handbook, Invesys AVP, Technical Centre, New York, USA, www.avp.invesys.com.
- [21] T. Kudra, E. Pallai, Z. Bartczak, M. Peter, Drying of paste–like materials in screw–type spouted–bed and spin–flash dryers, Drying Technol. **7** (1989) 583–597.
- [22] M. Benal, M. Amazouz, Effects of drying–aid agents on processing of sticky materials, Dev. Chem. Eng. Mineral Process **10** (2002) 1–14.

SUMMARY

PERFORMANCES OF CONTINUOUS DRYER WITH INERT MEDIUM FLUIDIZED BED

(Scientific paper)

Zorana Lj. Arsenijević¹, Željko B. Grbavčić², Radmila V. Garić-Grulović¹

¹Institute for Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade

²Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

A fluid bed dryer with inert particles represents a very attractive alternative to other drying technologies according to the main efficiency criteria, i.e. specific water evaporation rate, specific heat consumption and specific air consumption. A high drying efficiency results from the large contact area and from the large temperature difference between the inlet and outlet air. A rapid mixing of the particles leads to nearly isothermal conditions throughout the bed.

A fluid bed dryer with inert particles was used for drying of slurries. Experiments were performed in a cylindrical column 215 mm in diameter with glass spheres as inert particles. In this paper, results of drying experiments with slurries of Zineb fungicide, copper hydroxide, calcium carbonate and pure water used as the feed material are presented. In our fluidized bed we successfully dried a number of other materials such as: fungicides and pesticides (Ziram, Propineb, Mangozeb, copper oxy-chloride, copper oxy-sulphate, Bordeaux mixture), other inorganic compounds (calcium sulphate, cobalt carbonate, electrolytic copper, sodium chloride), and a complex compound (organo-bentonite).

The effects of operating conditions on dryer throughput and product quality were investigated. Main performance criteria, i.e. specific water evaporation rate, specific heat consumption and specific air consumption, were quantified. Temperature profile along the bed was mapped, and nearly isothermal conditions were found due to thorough mixing of the particles. Analysis of drying and energy efficiencies as a function of inlet and outlet air temperature difference was performed for deeper insight in dryer behavior and for optimizing dryer design and operation from an energy point of view. A simple mathematical model based on an overall heat balance predicts the dryer performance quite well.

The industrial prototype with fluid bed of 0.8 m in diameter and capacity 650 kg of evaporated moisture per hour was realized on the basis of presented investigations on pilot unit. The most important results are 50% decrease in energy consumption and no-additional grinding of dried product in comparison with old tunnel drying technology.

Key words: Fluidized bed • Inert particles • Drying • Solid-water suspensions •

Ključne reči: Fluidizovani sloj • Inertne čestice • Sušenje • Vodene suspenzije •