

**SUŠENJE SUSPENZIJA I PASTA U FLUIDIZOVANOM SLOJU
INERTNIH ČESTICA
DRYING OF SLURRIES AND PASTES IN FLUIDIZED BED OF INERT
PARTICLES**

Ž. B. Grbavčić

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Izvod

Sušenje suspenzija i pasta u fluidizovanom sloju inertnih čestica predstavlja atraktivnu alternativu ostalim postupcima sušenja u pogledu osnovnih kriterijuma za ocenu efikasnosti kao što su specifični kapacitet isparavanja, specifični utrošak toplote i specifični utrošak vazduha. 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. 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 energetskog aspekta. Jednostavni bilansi prenosa mase i toplote adekvatno predviđaju radni režim sistema za sušenje u fluidizovanom sloju inertnog materijala. Na bazi poluindustrijskih istraživanja realizovan je industrijski prototip kapaciteta isparavanja 650 kg_{H2O}/h. Ispitivanja su pokazala da je potrošnja energije u novom sistemu 50% niža u odnosu na raniju tehnologiju sušenja u tunelskim sušnicama.

Ključne riječi: čestice, sušenje, suspenzija.

Abstract

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. 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. 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: *Drying, Particles, Slurry.*

1. UVOD

Sušenje je veoma zastupljena operacija u hemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji i kao takva predstavlja značajni potrošač energije. Procesi 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 koncentrovanijim 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. Sa 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 [1-4]. Smatra se [1] da će ova tehnologija sušenja suspenzija i rastvora biti široko industrijski primenjena u narednim godinama.

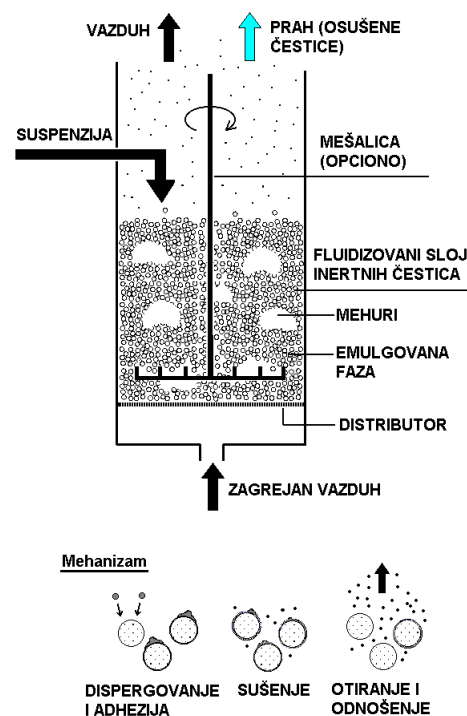
Sušenje suspenzija na inertnim česticama u fluidizovanom sloju

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 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 se uvodi suspenzija doći će do isparavanja vlage. Suspenzija se može uvoditi u sloj bilo raspršivanjem na gornju površinu, bilo ukapavanjem u sloj (sl.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 sa filmom suspenzije na staklenoj sferi biva osušen prah gubi adhezivne veze sa ostatkom i biva strujom vazduha iznet iz sloja. Uloga inertnih čestica je dvojaka: a) pošto su relativno teške, za njihovu fluidizaciju potrebna je relativno velika brzina vazduha, ostvaruju se turbulentni uslovi, a sa tim i visoke vrednosti koeficijenta prenosa toplote i mase i b) prisustvo inertnih sfera razvija površinu za razmenu toplote i mase.

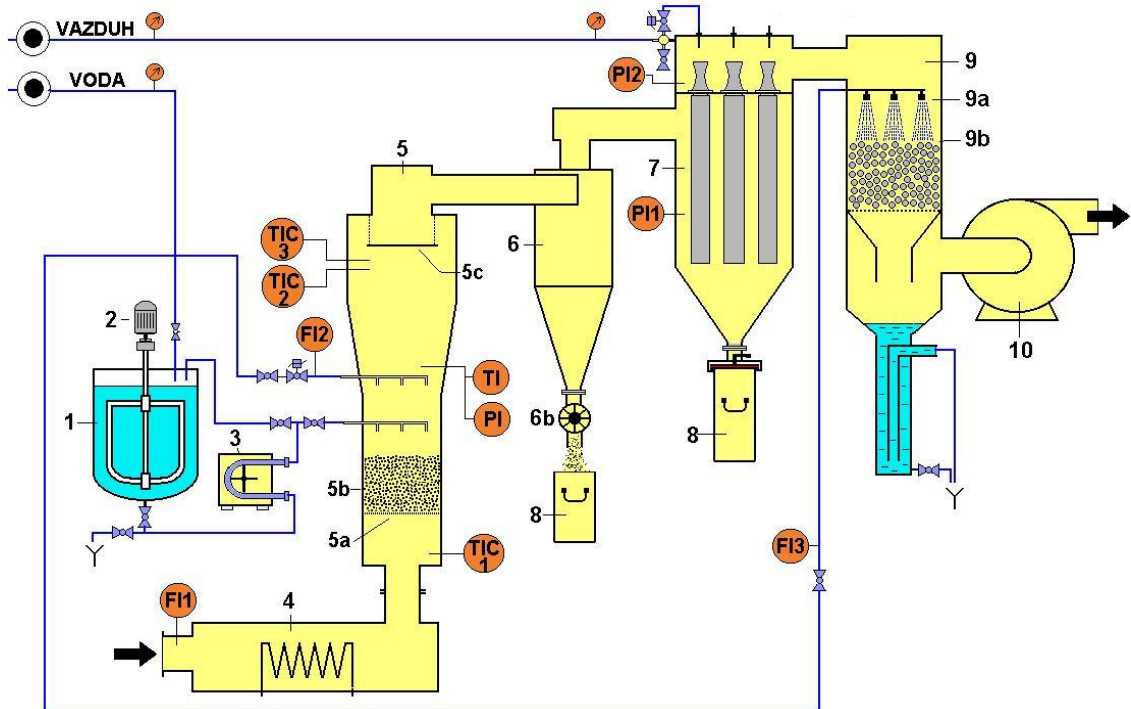
2. EKSPERIMENTALNI SISTEM

Poluindustrijski uređaj za sušenje suspenzija u fluidizovanom sloju inertnih staklenih sfera (sl.2) se sastoji od fluidizacione kolone (komore za sušenje), koja na dnu ima raspodeljivač vazduha i mrežu od nerđajućeg čelika. Fluidizaciona kolona je snabdevena mehaničkom mešalicom čija je uloga razbijanje eventualno stvorenih vlažnih agregata. 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 temperature sušenja (T_{ge}). Regulator temperature (TIC3) postavljen na istoj poziciji kao i TIC2 i setovan je na vrednost koja je za 20°C viša od zadate temperature sušenja i uloga TIC3 je da spreči eventualno pregrevanje sloja doziranjem čiste vode u sistem (zaštitni krug). Stvoreni prah se izdvaja u ciklonu i vrećastom filtru. Protok vazduha se meri pomoću prigušne ploče, a temperature ispred sloja, u sloju i iza sloja se mere digitalnim meračima temperature.



Slika1. Mehanizam sušenja suspenzija u fluidizovanom sloju

Komora za sušenje se sastoji od cilindrične kolone prečnika $D_c=215$ mm i visine 300 mm, na koji



Slika 2. Eksperimentalni sistem

(1 – rezervoar za suspenziju, 2 – mešalica, 3 – pumpa, 4 – električni predgrejač vazduha, 5 – fluidizaciona kolona, 5a – raspodeljivač, 5b – inertne čestice, 5c – odvajač čestica, 6 – ciklon, 6a – rotacioni ventil, 7 – vrećasti filter, 8 – rezervoari za prihvatanje praškastog produkta, 9 – skruber, 9a – mlaznica, 9b – punjenje-rašigovi prstenovi, 10 – ventilator, fi – indikator protoka, pi – indikator pritiska, ti – indikator temperature, tic – indikacija i kontrola temperature vazduha)

se

nastavlja konični deo prečnika 320 mm i gornji cilindrični deo visine 300 mm. Ukupna visina komore je 1200 mm, pri čemu je efektivna visina (iznad raspodeljivača vazduha) 900 mm. Inertno punjenje su 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). Statička visina inertnog sloja krupnijih čestica je $H=122$ mm, masa $M=6.79$ kg, ukupna površina čestica $A_p=8.6$ m², dok su za sitnije čestice ove vrednosti $H=80$ mm, $M=4.52$ kg, $A_p=11.12$ m². Minimalna brzina fluidizacije je određena standardnom procedurom na sobnoj temperaturi ($U_{mf} = 0.96$ m/s za čestice $d_p = 1.94$ mm, i $U_{mf} = 0.61$ m/s za čestice $d_p = 0.93$ mm). Površinska brzina vazduha (na sobnoj temperaturi) je varirana od 1.48 do 2.30 m/s, temperatura ulaznog vazduha (T_{gi}) je varirana između 153 i 358°C, dok je temperatura izlaznog vazduha (T_{ge}) održavana u intervalu od 65 do 125°C. Sadržaj vlage u polaznom materijalu koji se suši je iznosila od 0.40 do 0.75 kg_{H2O}/kg_{sus}.

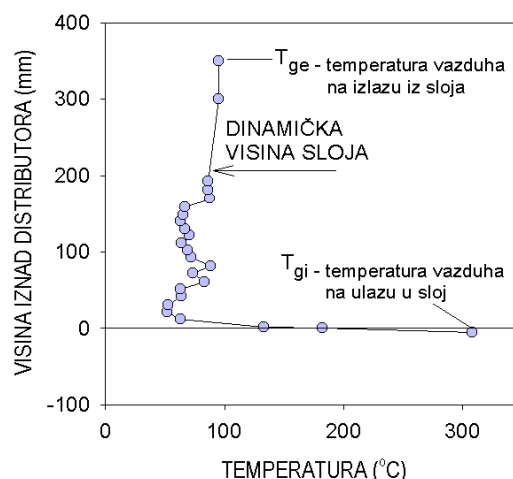
U radu su prikazane dve serije ogleda, u prvoj seriji je dozirana čista voda, a u drugoj seriji sušene su suspenzije Cineba (polimer-cink etilen-bis-ditiokarbamat, $[\text{CH}_2\text{-NH-CS}_2]_2\text{-Zn}$), bakar-hidroksida ($\text{Cu}[\text{OH}]_2$) i kalcijum karbonata (CaCO_3). Staklene sfere prečnika 1.94 mm korišćene su u svim ogledima, osim nekoliko ogleda 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.

3. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Proces sušenja suspenzija je izvođen kontinualno u poluindustrijskom sistemu. U svakom ogledu je podešavan protok vazduha i temperatura ulaznog vazduha (TIC1) na određenu vrednost. Proces doziranja u sistem otpočinje onog momenta kada je temperatura izlaznog vazduha dostigla setovanu vrednost (TIC2). U toku izvođenja procesa temperatura izlaznog vazduha je održavana na konstantnoj vrednosti s obzirom da TIC2 kontroliše dinamiku doziranja suspenzije u sistem (doziranje se izvodi u "on-off" modu). Stacionarni rad sistema se uspostavlja nekoliko minuta nakon što temperatura ulaznog vazduha dostigne zadatu vrednost (TIC1).

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 praha. Za fiksiranu brzinu i ulaznu temperaturu vazduha, željena temperatura sušenja se održava kontrolom doziranja 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 . 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



Slika 3. Aksijalni profil temperatura u sloju (za CaCO_3)

rezultuje u visokoj rezidualnoj vlazi produkta, dok visoka temperatura sušenja prouzrokuje smanjenje sadržaja aktivne materije.

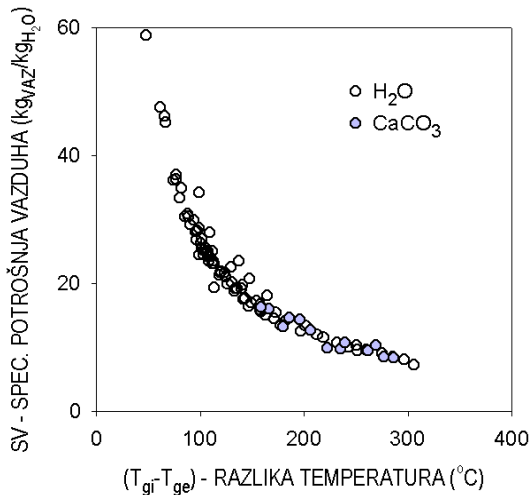
Na sl.3 prikazan je karakterističan aksijalni profil temperatura u sloju pri sušenju suspenzije CaCO_3 . U ovom slučaju su termoparovi bili postavljeni na 70 mm od zida kolone. Može se uočiti da temperatura sloja na vrlo kratkom rastojanju od raspodeljivača postaje približno konstantna. U tabeli 1 prikazani su podaci za jedan tipičan ogled sušenja suspenzije Cineba u fluidizovanom sloju inertnog materijala.

Tabela 1. Tipičan ogled sušenja u fluidizovanom sloju inertnog materijala (suspenzija cineb fungicida, $x = 0.70 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sus}}$, inertne čestice $d_p=0.93 \text{ mm}$)

Površinska brzina vazduha (20°C), m/s	U_0	2.1
Ulazna temperatura vazduha, °C	T_{gi}	195
Izlazna temperatura vazduha, °C	T_{ge}	67
Protok suspenzije, $\text{kg}_{\text{sus}}/\text{h}$	G_{SUS}	25.48
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_{sm}	7.64
Specifična isparljivost, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$	$W_{\text{H}_2\text{O}}$	491.4
Specifična potrošnja vazduha, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	SV	18.1
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	q	2405
Specifična potrošnja toplote (na osnovu $T_{\text{gi}}-T_0$), $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	qA	3250
Vlažnost produkta, %	s	0.78
Hold-up suspenzije i čestica produkta u sloju, %	h	7.1

Na sl.4 prikazan je specifični kapacitet isparavanja 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} , pri konstantnoj temperaturi ulaznog vazduha T_{gi} i konstantnoj površinskoj brzini ($U_0 = 1.8 \text{ m/s}$). Sa slike se uočava da kapacitet isparavanja može biti veoma visok, i do $1000 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{h}$. Zahvaljujući intenzivnom mešanju u sloju, izlazna temperatura vazduha je praktično jednaka temperaturi sloja, što je generalna karakteristika agregativno fluidizovanih sistema. Može se uočiti da je kapacitet isparavanja, pri konstantnoj brzini vazduha, direktno proporcionalan razlici temperatura ulaznog i izlaznog vazduha iz sloja, $T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$.

Na sl. 5 prikazan je specifični utrošak toplote pri isparavanju vode u funkciji razlike temperatura ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$). Utrošak toplote je najveći pri najmanjem ΔT , a asimptotski se približava teorijskom utrošku sa porastom ΔT . Budući da je realna potrošnja energije srazmerna ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$), podaci na ovoj slici sugerišu zaključak da je fluidizovani sistem utoliko termički efikasniji ukoliko radi na većoj razlici temperatura. Specifični utrošak vazduha pri isparavanju vode je (sl.6), takođe, manji što je razlika temperatura ($T_{\text{gi}}-T_{\text{ge}}$) veća.



Slika 6. Specifična potrošnja vazduha

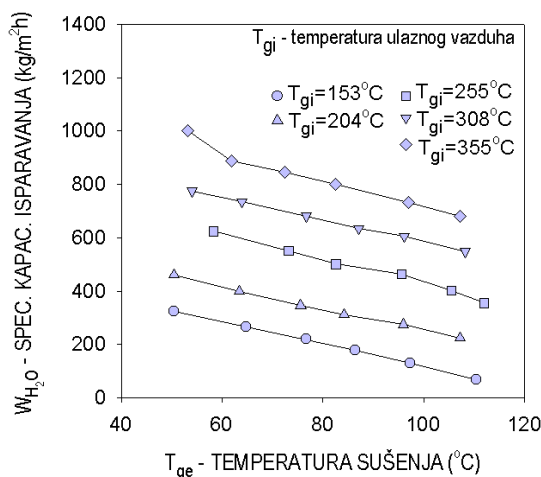
energetske efikasnosti u cilju boljeg sagledavanja performansi sušionika i optimizacije uređaja i procesa sa energetskeg aspekta. Energetska efikasnost (η_E) i efikasnost sušenja (η_D) su definisane kao:

$$\eta_E = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije}} \quad (1)$$

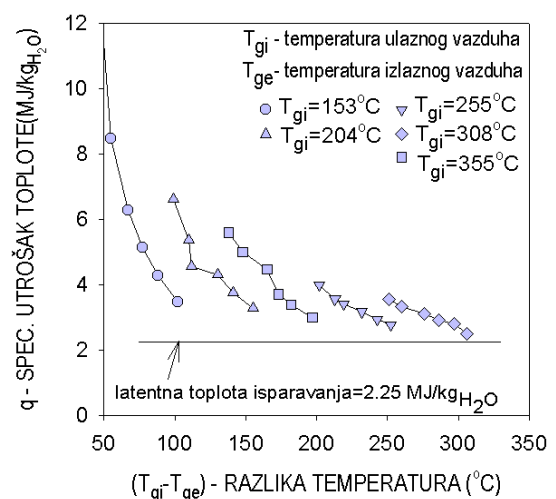
$$\eta_D = \frac{\text{Energija potrebna za isparavanje}}{\text{Ulaz energije} - \text{Izlaz energije}} \quad (2)$$

Efikasnost sistema i procesa sušenja mogu se opisati na različite načine. Generalno, bez obzira na definiciju efikasnosti, pri konvektivnom sušenju sa jednim prolazom medijuma za sušenje kroz vlažni materijal visoke efikasnosti se postižu na račun visoke temperature ulaznog vazduha i ostvarivanja uslova izlaznog vazduha bliskom stanju zasićenja. Kudra [6] je predložio simultanu analizu efikasnosti sušenja i

Na slikama 7a i 7b prikazane su zavisnosti efikasnosti sušenja (η_D) i energetske efikasnosti (η_E) u funkciji razlike temperatura $\Delta T = T_{gi} - T_{ge}$. U svim ogleđima u kojima je rađeno sa čistom vodom η_D je varirala od 0.46 do 0.95, a η_E je bila između 0.14 i 0.90, u zavisnosti od temperature ulaznog vazduha. Visoke vrednosti η_D i η_E odnose se na oglede u kojima je temperatura izlaznog vazduha bila neznatno viša od temperature mokre kugle. U procesu sušenja CaCO_3 suspenzija η_D je varirala između 0.75 i 0.95, a η_E između 0.53 i 0.75. Razmatrajući samo



Slika 4. Specifični kapacitet isparavanja

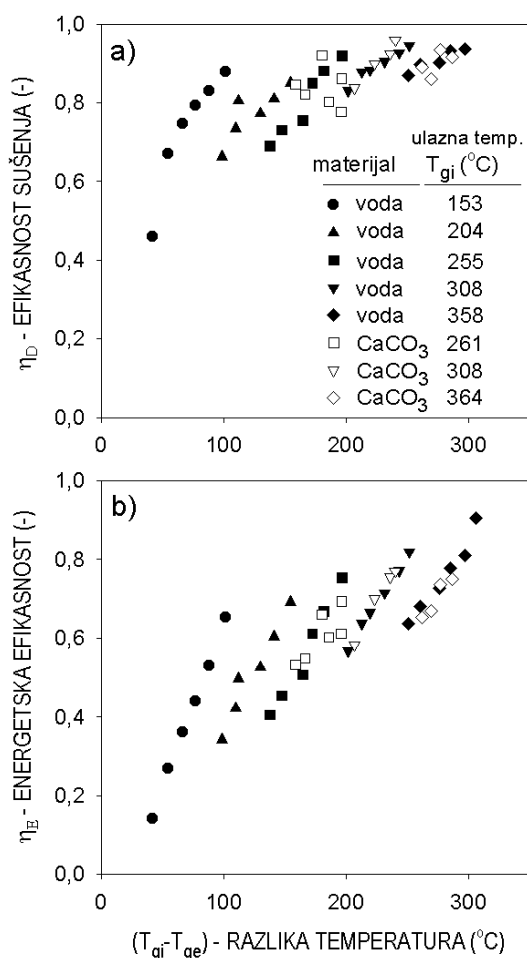


Slika 5. Specifični utrošak toplote

podatke za sušenje CaCO_3 suspenzije, proizilazi da su vrednosti za η_D i η_E relativno visoke u poređenju sa drugim sistemima za sušenje suspenzija [5,6]. Ovo indicira dobre performanse tehnologija zasnovanih na sušenju na inertnim česticama, bilo da se radi o sistemima sa

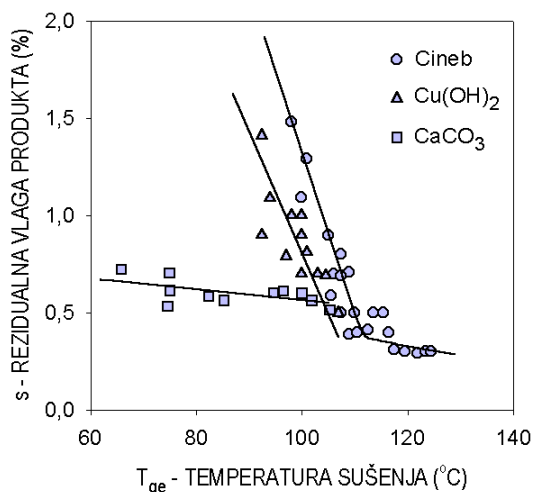
fluidizovanim ili fontanskim slojem. Efikasnost ovog sistema može se ilustrovati podatkom da je tipična specifična isparljivost kod sprej sušionika oko $50 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$, a kod sušionika sa fluidizovanim slojem inertnih čestica i do $1000 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$ po 1m^2 preseka uređaja.

Da bi se obezbedila maksimalna efikasnost procesa pri zadatoj temperaturi ulaznog vazduha (T_{gi}), potrebno je temperaturu izlaznog vazduha (T_{ge}) održavati na što nižoj mogućoj vrednosti koja je limitirana kvalitetom produkta i kvalitetom fluidizacije. Najčešće je rezidualna vlaga produkta glavni kriterijum za vođenje procesa. Sa sl. 8 se može uočiti da sadržaj vlage u izlaznom prahu opada sa povećanjem temperature sušenja. Oblik prikazanih zavisnosti zavisi od karakteristika materijala koji se suši. U slučaju CaCO_3 na sadržaj rezidualne vlage u prahu temperatura izlaznog vazduha praktično nema uticaja (sl. 8). U procesu sušenja na inertnim česticama moguće je očekivati izvestan stepen usitnjavanja materijala koji se tretira. Na primer, usled karakteristika Cineb fungicida, trenje i sudari između inertnih čestica u sloju prouzrokuju izvestan stepen sitnjenja, s obzirom da je srednji prečnik čestica dobijenog praha ($12.9 \mu\text{m}$) manji od srednjeg prečnika čestica u polaznoj suspenziji. U slučaju $\text{Cu}(\text{OH})_2$ i CaCO_3 suspenzija,



Slika 7. Efikasnost procesa sušenja

granulometrijski sastav suvog praha je skoro identičan granulometrijskom sastavu polazne suspenzije. U nekoliko ogleada određivano je zadržavanje (“hold-up”) praha u sloju inertnih čestica analizom uzoraka materijala iz sloja. Masa zadržanog praha u uzorku je određena iz razlike mase inertnih čestica sa “hold-up”-om i mase čistih inertnih čestica. U tabeli 2 su prikazani dobijeni rezultati. Za inertne čestice prečnika $d_p = 1.94 \text{ mm}$ “hold-up” varira između 0.50 i 3.68% u odnosu na ukupnu masu uzorka iz sloja. “Hold-up” materijala u sloju se smanjuje sa porastom temperature izlaznog vazduha (T_{ge}) pri konstantnoj temperaturi ulaznog vazduha, što je u saglasnosti sa zapažanjem da rezidualna vlaga praha takođe opada sa porastom temperature izlaznog vazduha. S obzirom da i sadržaj vlage materijala koji okružuje inertnu česticu opada sa povećanjem T_{ge} , opravdano je očekivati da ovaj sadržaj vlage direktno utiče na adhezivnost i “hold-up” u sloju. Za inertne čestice prečnika $d_p = 0.93 \text{ mm}$ “hold-up” je znatno veći (5 do 8%).



Slika 8. Režidualna vlažnost praha u funkciji temperature sušenja

Značajno je napomenuti da je kod suspenzije Cineba nakon sušenja u fluidizovanom sloju sadržaj aktivne materije u proseku 2 do 3% veći nego nakon 48h sušenja u postojećim industrijskim tunelskim sušnicama. U tunelskim sušnicama prosečno vreme sušenja na 80°C iznosi 24 h, za razliku od sušenja u fluidizovanom sloju gde je nominalno vreme zadržavanja materijala koji se suši veoma kratko, tipično oko 15 sec.

Tabela 2. "Hold-up" osušenog materijala u sloju inertnih čestica

Inertne čestice d_p , mm	Suspenzija	U_0 površinska brzina m/s	G_{sus} maseni protok suspenzije kg/h	T_{gi} ulazna temperatura °C	T_{ge} temperatura sušenja °C	h "hold-up" %
0.93	Cineb, X=0.70	2.10	25.5	195	67	7.10
1.94	CaCO ₃ , X=0.70	1.65	29.3	308	101	1.70
-II-	Cineb, X=0.67	1.70	35.2	311	87	3.68
-II-	-II-	1.70	34.6	311	97	1.48
-II-	-II-	1.70	29.5	311	108	1.14
-II-	-II-	1.70	24.1	250	86	2.15
-II-	-II-	1.70	21.5	250	96	1.18
-II-	-II-	1.70	17.7	250	106	0.91
-II-	-II-	1.70	13.4	198	85	1.27
-II-	-II-	1.70	10.6	198	92	0.56
-II-	-II-	1.70	8.6	198	106	0.50

Osnovni nedostatak predstavljenog sistema je pojava sinterovanja (slepljivanja) inertnih čestica pri sušenju nekih materijala i uspostavljanje ekstremnih operativnih uslova, tj. promena brzine doziranja suspenzije (Kudra i dr. [7]) ili izlazne temperature vazduha (Sl.8) 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 ugljene hidrate i masnoće je praktično nemoguća s obzirom da lepljivost tih materijala vodi ka nestabilnosti procesa, osim u slučajevima gde se dodaju razni aditivi [7] koji smanjuju adhezivnost. Sušenje svakog potencijalnog preparata se mora testirati na laboratorijskom nivou.

Na osnovu izvršenih oglada može se konstatovati: 1) Sistem radi stabilno i karakteriše ga visoka efikasnost. Specifična isparljivost je vrlo visoka $170\text{--}650 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{hm}^2_{\text{sloja}}$, zavisno od oglada. Iskorišćenje vazduha je, takođe, vrlo visoko. Vlažnost vazduha se na putu kroz sloj poveća od 4 do 11 puta, zavisno od oglada; 2) Ključ visoke efikasnosti u pogledu specifičnog utroška toplote q ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) i specifičnog utroška vazduha SV ($\text{kg}_{\text{VAZ}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$) je u visokoj razlici temperatura između ulaznog vazduha i sloja, $\Delta T = T_{\text{gi}} - T_{\text{ge}}$, pri čemu se temperatura sloja održava na željenoj (dozvoljenoj) vrednosti; 3) U svim ogledima sušenja suspenzija vlažnost dobijenog praha, kao i sadržaj aktivne materije su bili u zadovoljavajućim granicama; 4) Produkt se dobija u vidu suvog tečljivog praha. Pored toga, granulometrijski sastav produkta je nešto niži od granulometriskog sastava polazne suspenzije.

Industrijski prototip, koji je realizovan na osnovu istraživanja prikazanih u ovom radu nalazi se u eksploataciji od marta 2003. god., 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 $2.12 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{s}$ ostvari se kapacitet od 8.05 t suve materije za 24h, polazeći od suspenzije sa 65% H_2O . Može se uočiti da jedan relativno mali fluidizacioni uređaj zamenjuje veoma veliku komoru za sušenje. Ostvarena je ušteda energije za sušenje od najmanje 50% u odnosu na raniju tehnologiju sušenja, što je ekvivalentno uštedi od oko $825 \text{ m}^3_{\text{N}}$ 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.

4. ZAKLJUČAK

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 ($T_{\text{gi}} - T_{\text{ge}}$), je blizu teorijski potrebnog za faznu transformaciju vode tečnost-gas, tj. kreće se oko 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.

LITERATURA

- [1] Mujumdar, A., "Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects", *Drying Technology*, 2004, 22 (1&2), 1-26.
- [2] Romankov, P., "Fluidization", Davidson J and Harrison D, Eds., Academic Press, London, 1971, 569-598.
- [3] Povrenović, D., Grbavčić, Ž., Hadžismajlović, Dž., Vuković, D., Littman H, "Fluid-mechanical and thermal characteristics of spout-fluid bed drier with draft tube", "DRYING'91, Elsevier, Amsterdam, CA, 1992, 117, 343-351.
- [4] Hadžismajlović, Dž., Povrenović, D., Grbavčić, Ž., Vuković, D., Littman, H., "Fluidization VI", Grace, J., Shemilt, L. and Bergougnou, M., Eds., Engineering Foundation, New York, 1989, 277-283.
- [5] Kudra, T., Mujumdar, A., "Advanced Drying Technologies", Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [6] Kudra, T., "Instantaneous Dryer Indices for Energy Performance Analysis", "Inzynieria Chemiczna i Procesowa, 1998, 19(1), 163-172.
- [7] Kudra, T., Pallai, E., Bartczak, Z., Peter, M., "Drying of Paste-Like Materials in Screw-Type Spouted-Bed and Spin-Flash Dryers", *Drying Technology*, 1989, 7(3), 583-597.