

Proračun i optimizacija procesa proizvodnje bakar(II)-sulfat-monohidrata iz bakar(II)-sulfat-pentahidrata u sušnicama sa fluidizovanim slojem

Tatjana Kaluđerović Radoičić, Ivona Radović, Marija Ivanović, Nevenka Rajić, **Željko Grbavčić**

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu analiziran je proces dobijanja bakar(II)-sulfat-monohidrata iz bakar(II)-sulfat-pentahidrata, poznatijeg kao „plavi kamen“, u sušnicama sa fluidizovanim slojem. Bakar(II)-sulfat-pentahidrat je kristalohidrat u čijoj su kristalnoj strukturi četiri molekula vode vezana za bakar(II)-jon dok je peti molekul vode slobodan, tj, vodoničnim vezama povezan za sulfat-anjon. Optimalna temperatura zagrevanja kao i dužina zagrevanja za uklanjanje četiri molekula vode iz molekula pentahidrata utvrđeni su na osnovu termogravimetrijske (TGA) analize. Za analizu su upotrebene čestice različite granulacije: srednjeg prečnika 0,17 mm i 0,5 mm. U poluindustrijskom postrojenju određene su krive fluidizacije i krive sušenja analiziranih uzoraka. Nakon laboratorijskih i poluindustrijskih eksperimenata izvršeno je materijalno i energetske bilansiranje realnog postrojenja sa kapacitetom proizvodnje od 300 t mesečno. Proračuni neophodne količine agensa za sušenje i dimenzija postrojenja izvršeni su korišćenjem programskih paketa SuperPro Designer 5.1 i Simprosys 3.0. Takođe, analizirana je i mogućnost recirkulacije agensa za sušenje.

Ključne reči: sušenje u fluidizovanom sloju, bakar(II)-sulfat-pentahidrat, bakar(II)-sulfat-monohidrat, TGA analiza.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Bakar(II)-sulfat-pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) predstavlja jednu od najznačajnijih soli bakra koja je bila poznata još starim Egipćanima. U XIX veku otkriveno je da ima fungicidno dejstvo što je podstaklo njenu industrijsku proizvodnju. Koristi se takođe kao algicid, herbicid, za uništavanje korova, a najviše u smeši sa krečom u vinogradarstvu. U prirodi se nalazi kao izrazito plavo jedinjenje, so koja je u obliku kristalohidrata, poznata kao „plavi kamen“. Osim kao pentahidrat, bakar(II)-sulfat se javlja još u nekoliko oblika u zavisnosti od stepena hidratacije od kojih se najčešće upotrebljavaju bakar(II)-sulfat-monohidrat i anhidrovani bakar(II)-sulfat. Bakar(II)-sulfat se široko primenjuje u poljoprivredi, kao agens za sušenje, u proizvodnji tekstila, kože, industriji boja, itd.

U kristalnoj rešetki bakar(II)-sulfat-pentahidrata, četiri molekula vode nalaze se u koordinacionoj sferi Cu(II)-jona, dok je peti molekul slobodan (slika 1). Peti molekul vode povezan je vodoničnim vezama sa sulfat-jonom. Četiri molekula vode vezana su za Cu(II) koordinacionim vezama. Posmatrano u prostoru, četiri molekula vode raspoređena su tako da se atomi kiseonika iz molekula vode nalaze na temenima kvadrata u čijem centru je smešten Cu(II). Dužine sve četiri veze su jednake i iznose 0,19–0,20 nm [1–4].

Prepiska: T. Kaluđerović Radoičić, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija.

E-pošta: tanjak@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 11. februar, 2014

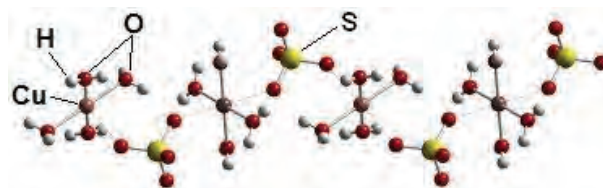
Rad prihvaćen: 25. mart, 2014

STRUČNI RAD

UDK 66.047:661.856:54

Hem. Ind. 69 (3) 275–286 (2015)

doi: 10.2298/HEMIND140211043K



Slika 1. Šematski prikaz kristalne strukture bakar(II)-sulfat-pentahidrata. "O" označava atome kiseonika, "S" atome sumpora, "H" atome vodonika i "Cu" atome bakra.
Figure 1. Schematic representation of the crystal structure of copper (II) sulfate pentahydrate. "O" is oxygen atom, "S" is sulfur atom, "H" is hydrogen atom, and "Cu" is copper atom.

Pažljivim zagrevanjem kristalohidrata dolazi do postepene dehidratacije. Na oko 70 °C proizvod zagrevanja $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ je trihidrat, $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. U ovom kristalohidratu, atomi kiseonika iz tri molekula vode i atom kiseonika iz sulfat-jona obrazuju deformisan kvadrat u kome su veze Cu(II) i atoma kiseonika iz molekula vode nešto kraće (0,196 nm). Daljim zagrevanjem, moguće je izvršiti potpunu dehidrataciju i dobiti anhidrovanu so, CuSO_4 , kod koje je Cu(II) vezan za atome kiseonika iz sulfat-jona [1–4].

Proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala – sušenje, je veoma rasprostranjen industrijski proces kojim se dobijaju proizvodi željenih karakteristika. Uklanjanje vlage se može vršiti mehaničkim, hemijskim, termičkim ili drugim postupcima u zavisnosti od kapaciteta proizvodnje, vrste vlažnog materijala kao i od prirode vezane vlage [5,6]. Uređaj u kome se obavlja proces uklanjanja vlage naziva se sušnica i ona je deo postrojenja za sušenje. Najrasprostranjeniji su termički postupci ukla-

njanja vlage, među kojima prednjači konvektivni postupak kod koga se sušenje vlažnog materijala obavlja posredstvom zagrejanog gasovitog agensa. U industrijskoj upotrebi je veliki broj konvektivnih sušnica vrlo različitih konstruktivnih karakteristika (rotacione, pneumatske, sprej sušnice, sušnice sa pokretnom trakom, tunelske, gravitacione i dr.), a među najrasprostranjenijim su sušnice sa fluidizovanim slojem.

Sušnice sa fluidizovanim slojem se intenzivno koriste za sušenje praškastog i zrnastog materijala, kao i za pastasti i tečni materijal koji se posebnim postupkom nanose na inertnu česticu (nosač). Fluidizovanje vlažnog materijala se ostvaruje strujanjem agensa za sušenje uz pomoć distributera gasovite faze. Primenjuje se u različitim industrijskim procesima i to za sušenje hemikalija, hrane, biomaterijala, ugljovodonika, u proizvodnji pića, lekova, keramike, pesticida, boja i pigmenta, polimera i dr. Prednosti ovog načina sušenja su u dobrom mešanju čestica, velikoj brzini prenosa mase i toplote i lakom transportu materijala. Za sušenje praškastih čestica veličine od 50–200 μm , fluidizovane sušnice su u prednosti u odnosu na ostale tipove [5].

Fluidizovani sloj se formira prolaskom gasa sa dna kolone kroz sloj čvrstih čestica koje se u njoj nalaze. U cilju ravnomerne raspodele gasa u sloju, na dno kolone se ugrađuje distributor. Ukoliko je brzina gasa mala, sloj će ostati nepokretan tj. čestice ostaju u pakovanom sloju. Pad pritiska kroz pakovani sloj raste sa povećanjem brzine gasa, do trenutka kada se dostigne minimalna brzina fluidizacije. U tom trenutku je pritisak po jedinici mase sloja jednak težini sloja i dolazi do fluidizacije. Ova tačka se naziva tačkom minimalne fluidizacije, a brzina gasa je minimalna brzina fluidizacije, U_{mf} [7]. Proces sušenja se obično izvodi pri površinskoj brzini gasa koja je nekoliko puta (2–4) veća od minimalne brzine fluidizacije [5,7].

Na proces sušenja u fluidizovanom sloju utiče veliki broj parametara, a jedan od najbitnijih je veličina čestica. Geldart [8] je izvršio klasifikaciju materijala prema načinu ponašanja prilikom fluidizacije. Materijale je podelio u četiri grupe označene kao A, B, C i D. Na slici 2 prikazana je Geldartova klasifikacija materijala. Sa ovog dijagrama moguće je na osnovu prečnika čestice i razlike gustina čestica i fluida odrediti grupu u koju čestice spadaju. Karakteristike grupa čestica po Geldartu [8] su sledeće:

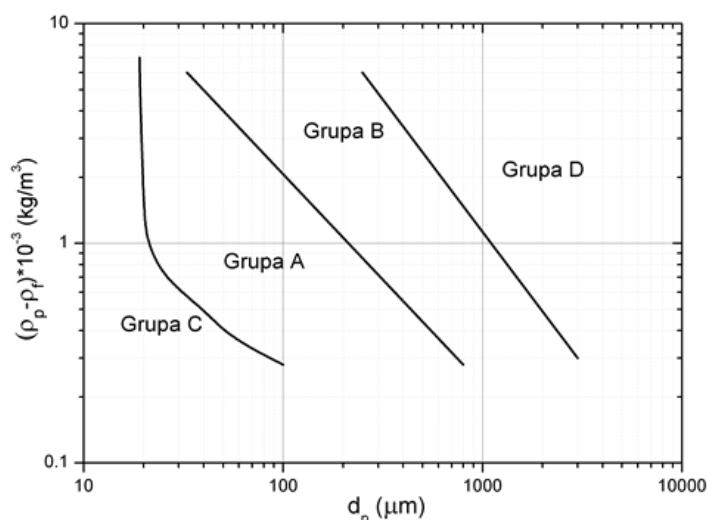
Grupa A. U ovu grupu spadaju materijali koji se mogu aerisati, tj. prodivavanjem gasa kroz sloj ovakvog materijala doći će do razdvajanja čestica. Ovakvo ponašanje je karakteristično za male i relativno lake čestice čija je gustina, $\rho_p < 1400 \text{ kg m}^{-3}$. Ove čestice lako fluidizuju. Pri većim brzinama gasa sloj je okarakterisan malim mehurima.

Grupa B. U ovu grupu spadaju svi materijali slični pesku. Najčešće su to čestice veličine od 40 do 500 μm , čija je gustina 1400 do 4000 kg m^{-3} . Ove čestice lako fluidizuju, ali u sloju dolazi do intenzivnog stvaranja mehura, čija se veličina povećava po visini sloja.

Grupa C. Kohezivni ili vrlo fini praškovi. U ovom slučaju fluidizacija je praktično nemoguća jer su međučestične privlačne sile velike. U ovom slučaju gas formira kanale u sloju, kroz koje prolazi praktično bez kontakta sa česticama.

Grupa D. U ovu grupu spadaju krupne i/ili teške čestice ($d_p > 500 \mu\text{m}$, $\rho_p > 1400 \text{ kg m}^{-3}$), koje se takođe ne mogu fluidizovati. Ovde je brzina rasta mehura veoma velika i praktično trenutno se formiraju klipovi gasa u materijalu. Materijali iz ove grupe se mogu fontanovati [8].

U ovom radu izvršen je proračun industrijskog postrojenja za proizvodnju 500 kg/h bakar(II)-sulfat-monohidrata polazeći od bakar(II)-sulfat-pentahidrata. Radi



Slika 2. Dijagram $(\rho_p - \rho_f) = f(d_p)$, prema Geldartu [8].

Figure 2. The diagram $(\rho_p - \rho_f) = f(d_p)$ according to Geldart [8].

dobijanja podataka potrebnih za odabir i proračun sušnice, prethodno su izvršena laboratorijska ispitivanja polazne sirovine ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), kao i osušenog proizvoda ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Takođe, konstruisan je laboratorijski sistem u kome su ispitane fluidizacione karakteristike materijala i određena kriva sušenja. U radu je izvršen odabir i proračun industrijskog postrojenja za sušenje, kao i materijalno i energetsko bilansiranje procesa.

MATERIJAL I METODE

U ovom radu je kao polazna sirovina korišćen bakar(II)-sulfat-pentahidrat proizvođača kompanije "NEKK Europe" Ltd., Velika Britanija. Analizirana su dva uzorka $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ različitih granulometrijskih karakteristika, koji će u daljem tekstu biti označeni kao uzorak 1 i uzorak 2. Osnovne karakteristike materijala date su u tabeli 1. U cilju dobijanja podataka potrebnih za projektovanje postrojenja za proizvodnju $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, izvršene su granulometrijska i termogravimetrijska (TGA) analiza polazne sirovine, kao i ispitivanja fluidizacionih karakteristika materijala i kinetike sušenja u laboratorijskom postrojenju.

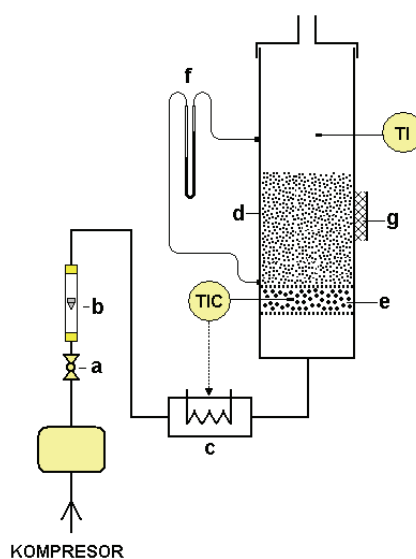
Granulometrijska analiza izvršena je korišćenjem metode standardnih sita, odnosno prosejavanjem materijala. Uređaj za prosejavanje sastojao se od rama na koji su učvršćena sita po rastućoj veličini okaca. Ram je zajedno sa sitima pričvršćen za elektromotor koji proizvodi oscilatorne udare koji se zatim prenose na čitav sistem. Prosejavanje materijala je vršeno tokom 15 min, jer duže vreme prosejavanja može da dovede do abrazije. Kao rezultat prosejavanja dobijeni su maseni udeli pojedinih frakcija čestica, na osnovu čega je moguće izvršiti granulometrijsku analizu. Kao reprezentativan prečnik za svaku frakciju uzima se aritmetička sredina dimenzije okaca gornjeg i donjeg sita.

Termogravimetrijska (TGA) analiza – dehidracija bakar(II)-sulfat-pentahidrata je urađena korišćenjem simultanog TG-DSC-DTG termičkog analizatora SDT Q600, TA Instruments. Uzorci mase 6–10 mg zagrevani su u otvorenim lončićima izrađenim od aluminijum-oksida (proizvođač TA Instruments) zapremine 90 μl . Tokom zagrevanja, protok vazduha iznosio je 100 cm^3/min , a brzina zagrevanja 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$. Za analizu su upotrebljene dve granulacije kristalohidrata i zagre-

vanje je obavljeno u dva različita režima: kontinualno do 500 $^\circ\text{C}$ i izotermiski na temperaturama 160, 170 i 180 $^\circ\text{C}$ u trajanju 30–90 min.

Sušenje u fluidizovanom sloju

U cilju ispitivanja fluidizacionih karakteristika materijala (minimalne brzine fluidizacije i pada pritiska u fluidizovanom sloju) izvršena su hidrodinamička ispitivanja u laboratorijskoj fluidizacionoj koloni kružnog poprečnog preseka, prečnika $D=60$ mm. Šematski prikaz aparature dat je na slici 3. Aparatura se sastoji od kolone sa česticama kroz koju se propušta vazduh prethodno zagrejan električnim grejačem (c). Protok vazduha se meri rotametrom (b). Ostali elementi sistema prikazani su na slici 3.



Slika 3. Šematski prikaz laboratorijske kolone za sušenje u fluidizovanom sloju; a) ventil, b) rotametar, c) električni grejač, d) kolona, e) distributor, f) manometar i g) termička izolacija. Figure 3. Schematic representation of the laboratory drying fluidized bed column; a) valve, b) rotameter, c) electric heater, d) column, e) distributor, f) gauge and g) thermal insulation.

Materijalno i energetsko bilansiranje sušnice

Proračun industrijskog postrojenja za proizvodnju $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ izvršen je korišćenjem programskih paketa Simprosys 3.0 [9] i SuperPro Designer 5.1 [10].

Tabela 1. Osnovne karakteristike materijala
Table 1. Basic properties of the materials

Naziv	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}^a$	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}^a$
CAS ^b registarski broj	7758-99-8	10257-54-2
Molekulska masa, g mol^{-1}	249,68	177,62
Gustina, kg m^{-3}	2284	3200
Nasipna gustina, kg m^{-3}	1205 ^c	1190 ^c
Rastvorljivost u vodi, g L^{-1} (20 $^\circ\text{C}$)	320	–

^aKarakteristike po specifikaciji proizvođača (NEKK Europe, Ltd.), osim nasipne gustine; ^bChemical Abstracts Service; ^ceksperimentalna vrednost

Simprosys 3.0 [9] je programski paket dizajniran za proračun masenog i energetskog bilansa procesa sušenja, isparavanja ili kombinacije ova dva procesa. Simprosys 3.0 ima mogućnost bilansiranja 20 jedinica (sušnice za čvrste i tečne materijale, ciklon, filter za vazduh, filter vreća, elektrostatički filter, ventilator, kompresor, mokri skruber, skruber kondenzator, pumpa, grejač, hladnjak, kompresor, razmenjivač toplote, mešač i dr.) čijim se povezivanjem može bilansirati čitavo postrojenje. Simprosys daje mogućnost simulacije procesa sa recirkulacijom toka sušenog materijala ili vazduha. Na osnovu postavljenih zahteva jednostavno se dobijaju maseni i energetski bilans kao i potrebni parametri sušenja (potreban protok vazduha za sušenje, kapacitet i snaga ventilatora, energija razmenjena u grejaču i dr.). U okviru rezultata bilansa dobijaju se vrednosti toplotne efikasnosti i specifične toplotne potrošnje sušnice. Menjanjem ulaznih i izlaznih parametara optimizuju se uslovi rada pojedinačnih uređaja i čitavog postrojenja.

SuperPro Designer 5.1 [10] je programski paket koji služi za materijalno i energetsko bilansiranje kao i za dimenzionisanje postrojenja, u ovom slučaju sušnice. Ovaj programski paket za razliku od Simprosys softvera daje mogućnost proračuna konstruktivnih karakteristika sušnice za: sušnice sa pokretnom trakom, sprej sušnice, rotacione sušnice, dobošaste sušnice, sušnice sa fluidizovanim slojem i sublimacione sušnice.

REZULTATI I DISKUSIJA

Granulometrijska analiza materijala

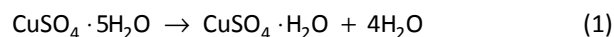
Rezultati granulometrijske analize dve vrste uzoraka polazne sirovine $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (uzorci 1 i 2), kao i osušenog proizvoda $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dobijenog od ovih uzoraka prikazani su na slici 4. Uzorak 1 sušen je u fluidizo-

vanom sloju, dok je uzorak 2 sušen u pakovanom sloju. Sa slike 4 se može videti da se tokom procesa sušenja praktično ne menja granulometrijski sastav ni kod jednog od uzoraka, budući da osušeni proizvod ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ima neznatno niži granulometrijski sastav u odnosu na početni materijal ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Na osnovu granulometrijske analize utvrđeno je da je srednji prečnik čestica iz uzorka 1 $d_{p,sr1} = 0,5$ mm, dok je srednji prečnik čestica uzorka 2 $d_{p,sr2} = 0,17$ mm.

TGA analiza

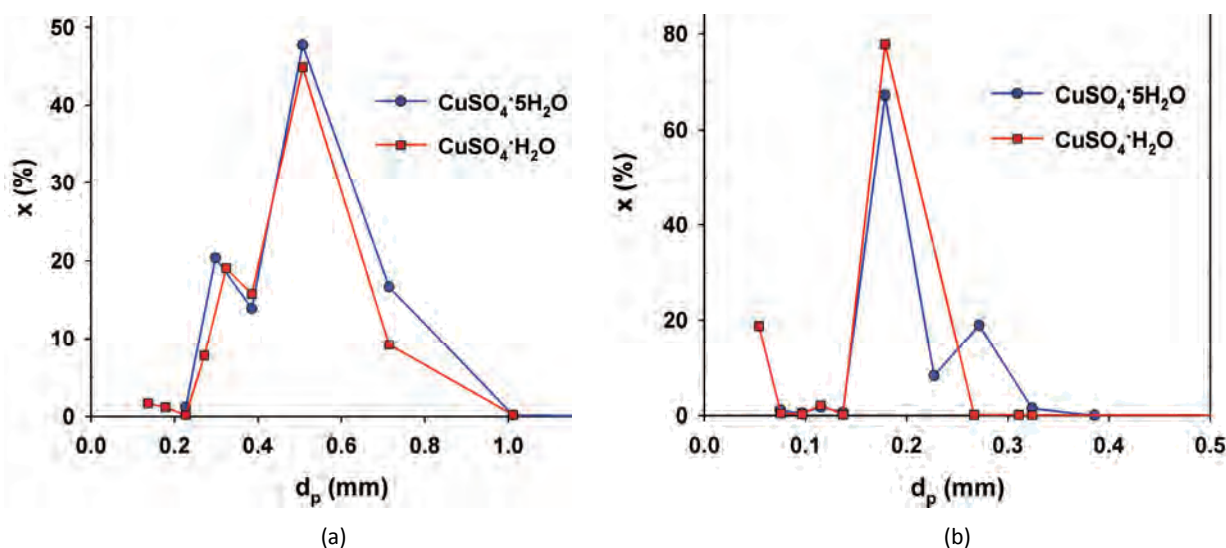
Mehanizam dehidratacije bakar(II)-sulfat-pentahidrata predmet je brojnih studija u proteklih osamdesetak godina [1–4]. Rezultati ukazuju da ovaj materijal ima neka jedinstvena termička svojstva. Na primer, brzina dehidratacije $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tokom zagrevanja zavisi od eksperimentalnih uslova. Kristali $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ispoljavaju i tzv. Smith–Topley efekat po kome proces dehidratacije zavisi od napona vodene pare [1–4].

Proces dehidratacije bakar(II)-sulfat-pentahidrata do monohidrata može se prikazati sledećom hemijskom jednačinom:

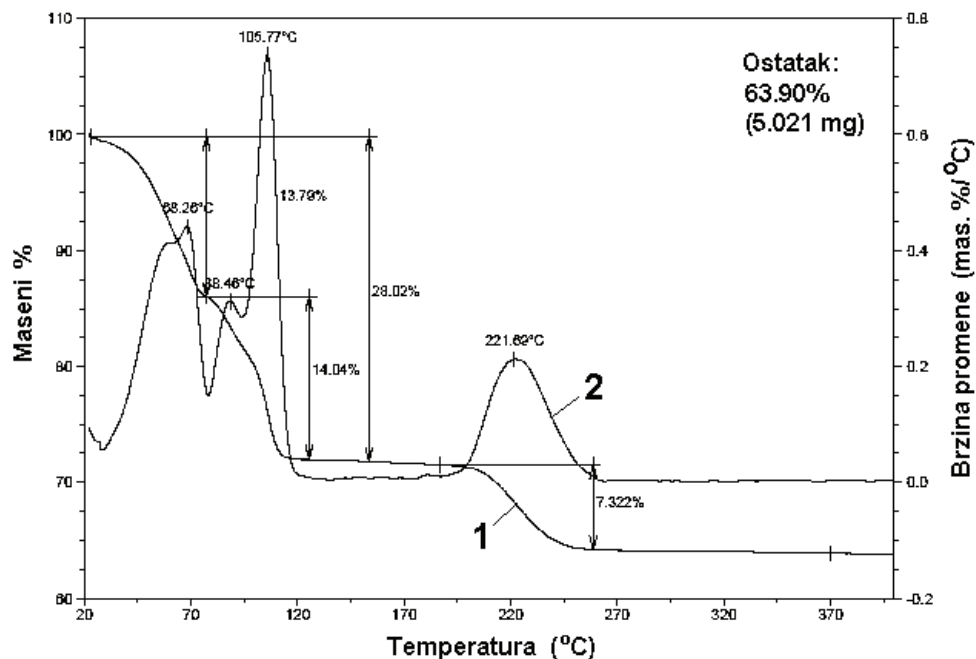


Tokom dehidratacije pod vakuumom, monohidrat nastaje već na 70°C , dok se zagrevanjem na vazduhu na 70°C dobija trihidrat. Energija aktivacije za proces dehidratacije u vakuumu značajno je manja (oko 50 kJ mol^{-1}) u odnosu na dehidrataciju u vazduhu (115 kJ mol^{-1}). Proces dehidratacije takođe zavisi od veličine čestica $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kao i od brzine zagrevanja.

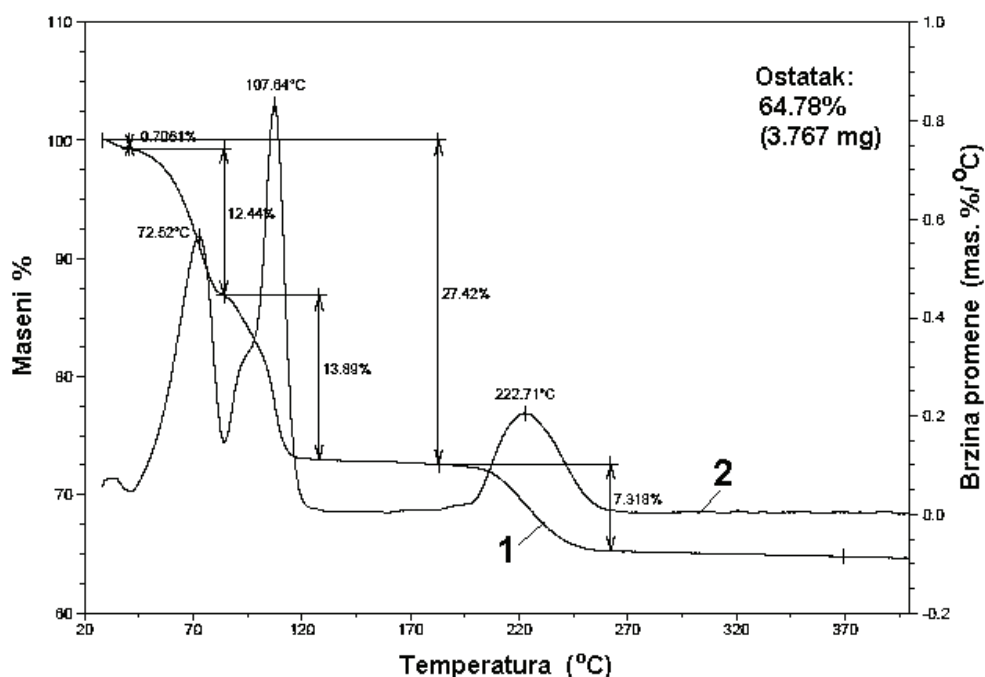
Na slici 5 prikazani su rezultati TGA analize uzorka 1 ($d_{p,sr1} = 0,5$ mm), dok su na slici 6 prikazani rezultati analize uzorka 2 ($d_{p,sr2} = 0,17$ mm).



Slika 4. Granulometrijska analiza uzoraka. a) Uzorak 1 pre i posle sušenja, b) uzorak 2 pre i posle sušenja.
Figure 4. Granulometric analysis of the samples. a) Sample 1 before and after drying, b) sample 2 before and after drying.



Slika 5. Rezultati TGA analize uzorka 1. 1 – TG-kriva – promena mase sa temperature; 2 – DTG-kriva-brzina promene mase.
Figure 5. TGA analysis of sample 1. 1 – TG-curve – mass change mass vs. temperature; 2 – DTG-curve-rate of mass change.



Slika 6. Rezultati TGA analize uzorka 2. 1 – TG-kriva – promena mase sa temperaturom; 2 – DTG-kriva – brzina promene mase.
Figure 6. TGA analysis of the sample 2. 1 – TG-curve – mass change vs. temperature; 2 – DTG-curve – rate of mass change.

Tri DTG-maksimuma na slici 5 ukazuju da se proces dehidracije u temperaturnom intervalu 20–300 °C odvija u tri koraka. Prvi maksimum se nalazi na 68,3 °C, drugi na 105,8 °C i treći na 221,7 °C. Svaki od ovih maksimuma prati određen gubitak mase koji se može očitati sa TG-krive.

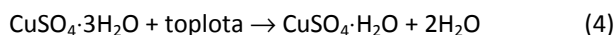
Kristalohidrat $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ima molarnu masu 249,5 g/mol. Prvom koraku (na 68,3 °C) odgovara gubitak mase od oko 14 mas.%. Iz ovog podatka može se izračunati molarna masa segmenta koji napušta rešetku kristalohidrata:

$$0,14 \times 249,5 = 35,9 \approx 36 \quad (2)$$

Pošto dva molekula vode imaju relativnu molekulsku masu 36, može se zaključiti da se u ovom koraku odigrava sledeća hemijska reakcija:



Gubitak mase u drugom koraku ($105,8^\circ\text{C}$) takođe iznosi oko 14 mas.% što odgovara reakciji:



Kako se sa dijagrama može zapaziti, nastali monohidrat termički je stabilan u temperaturnom opsegu od $120\text{--}195^\circ\text{C}$. Naime, u ovom temperaturnom opsegu ne dolazi do promene mase uzorka. Peti molekul vode napušta kristalohidrat u trećem koraku, na $221,7^\circ\text{C}$ što odgovara gubitku mase od 7,3 mas.%. Zaostali proizvod je anhidrovana so, CuSO_4 (teorijska vrednost za procentni sadržaj jednog molekula H_2O u molekulu $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ iznosi 7,03 mas.%). Sa slike 6 takođe se može zaključiti da se dehidratacija monohidrata odigrava u širem temperaturnom intervalu ($195\text{--}250^\circ\text{C}$).

Rezultati prikazani na slici 6 u skladu su sa literaturnim navodima koji ukazuju da veličina zrna utiče na mehanizam dehidratacije [11]. Prvi i drugi korak se u slučaju uzorka 2, u kome je granulacija manja, odigravaju na nešto višoj temperaturi ($72,5$ i $107,6^\circ\text{C}$, redom) u odnosu na uzorak 1 (krupnija granulacija), dok se temperatura odigravanja trećeg koraka značajnije ne menja ($222,7^\circ\text{C}$). Ono što je od značaja za ovaj rad je da temperaturni opseg u kome je monohidrat termički stabilan ostaje praktično nepromenjen ($120\text{--}195^\circ\text{C}$).

Da bi se ispitala kinetika dehidratacije, oba uzorka zagrevana su izotermiski na tri temperature od kojih se 180°C pokazalo da predstavlja optimalnu temperaturu za izvođenje procesa dobijanja monohidrata iz pentahidrata. Na slici 7 prikazane su zavisnosti promene mase uzorka sa vremenom pri izotermiskom zagrevanju uzorka na 180°C .

Sa dijagrama na slici 7a zapaža se da uzorak 1 zagrevanjem tokom 35 min na 180°C gubi 28,9 mas.% što u potpunosti odgovara gubitku mase (28,1 mas.%) tokom reakcije prikazane sledećom hemijskom jednačinom:



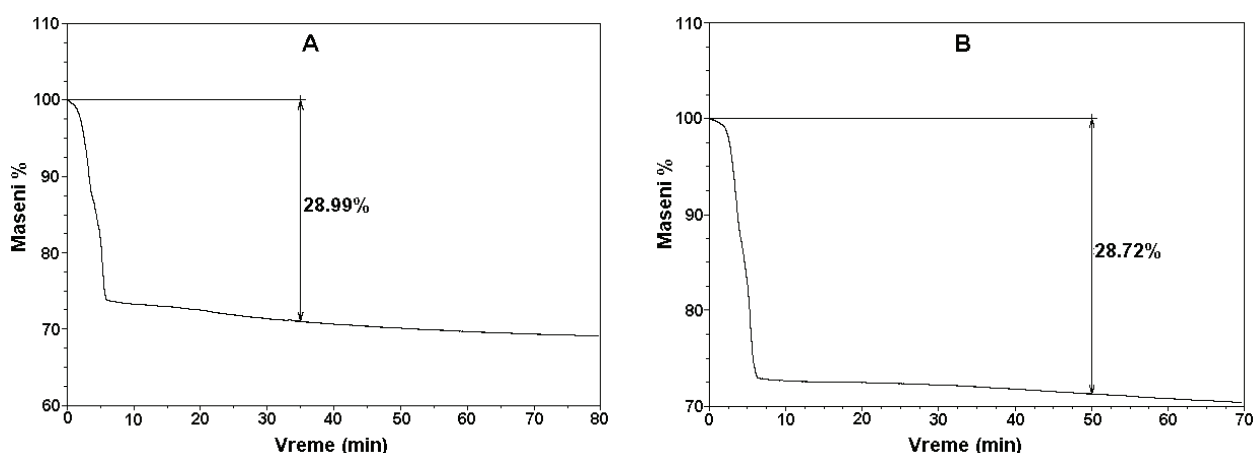
Reakcija prelaska pentahidrata u monohirat za uzorak sitnije granulacije (slika 7b) traje 50 min, tj. neophodno je obezbediti duže vreme zagrevanja nego u slučaju uzorka koji je krupnije granulacije što još jednom potvrđuje da brzina dehidratacije zavisi od veličine zrna.

Sušenje bakar(II)-sulfat-pentahidrata u fluidizovanom sloju

Ispitivanja fluidizacionih osobina materijala, kao i kinetike sušenja izvršena su u laboratorijskoj fluidizacionoj koloni kružnog poprečnog preseka, prečnika $D = 60$ mm.

Prema Geldartovoj klasifikaciji materijala [8] oba uzorka spadaju u grupu B materijala sličnih pesku, koji dobro fluidizuju ($d_{p, sr1} = 0,5$ mm, $d_{p, sr2} = 0,17$ mm, $\rho_p - \rho \approx \rho_p = 2284$ kg m⁻³). Međutim, na osnovu ispitivanja u laboratorijskoj fluidizacionoj koloni zaključeno je da samo uzorak 1 ($d_{p, sr1} = 0,5$ mm) pokazuje dobre fluidizacione karakteristike tipične za agregativno fluidizovane slojeve grupe B po Geldart-ovoj klasifikaciji. Uzorak 2 ($d_{p, sr2} = 0,17$ mm), iako se prema svojim osobinama (prečniku i gustini čestica) nalazi u grupi B po Geldartu, gotovo ne fluidizuje usled stvaranja kanala kroz koje protiče veći deo gasa u sloju (slika 8), bez kontakta sa masom materijala, što je tipično za sitne kohezivne materijale grupe C po Geldartu. Ovakvi materijali mogu se fluidizovati na taj način što se u sloj postavljaju različiti mehanički elementi (mešalica ili vibrirajuće rešetke).

S obzirom na činjenicu da uzorak 2 ne fluidizuje, kriva fluidizacije data je samo za uzorak 1. Na slici 9

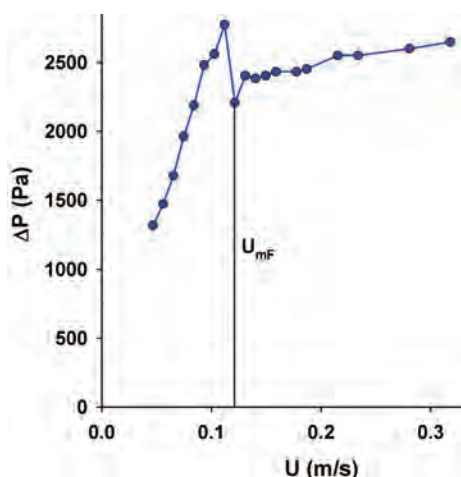


Slika 7. Rezultat TGA analize – promena mase uzorka sa vremenom tokom izotermiskog zagrevanja na 180°C , a) uzorak 1 i b) uzorak 2.
Figure 7. Results of the TGA analysis – sample mass change vs. time during isothermal heating at 180°C , a) sample 1 and b) sample 2.

prikazana je kriva fluidizacije ovog uzorka dobijena u laboratorijskoj fluidizacionoj koloni prečnika $D = 60$ mm. Sa slike 9 se može videti da je kriva fluidizacije za materijal iz uzorka 1 klasičnog oblika. Minimalna brzina fluidizacije ovog materijala očitana sa grafika iznosi $U_{mf} = 0,121 \text{ m s}^{-1}$.



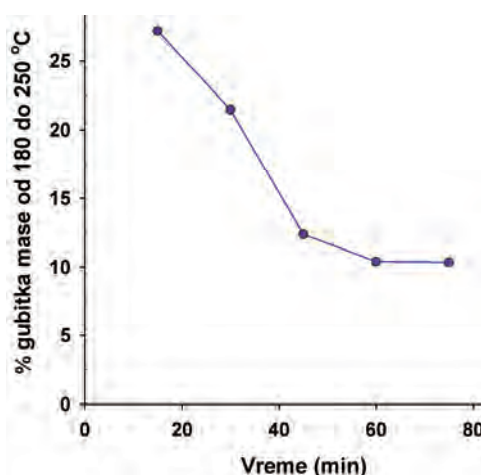
Slika 8. Fluidizacija čestica srednjeg prečnika 0,17 mm.
Figure 8. Fluidization of particles of mean diameter 0.17 mm.



Slika 9. Kriva fluidizacije uzorka 1 (srednjeg prečnika 0,5 mm).
Figure 9. Fluidization curve of sample 1 (mean diameter 0.5 mm).

S obzirom na činjenicu da je TGA analizom utvrđena optimalna ulazna temperatura grejnog fluida – vazduha od $180 \text{ }^\circ\text{C}$, kriva sušenja je određena pri ovoj ulaznoj temperaturi vazduha. Izlazna temperatura vazduha iznosila je $120 \text{ }^\circ\text{C}$, a brzina vazduha $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Pri ovim uslovima, praćena je dinamika procesa sušenja (slika 10) na osnovu čega je zaključeno da vreme kontakta u sloju treba da iznosi minimalno 60 min. Na slici 10 prikazan je gubitak mase materijala sušenog u fluidizovanom sloju tokom različitih vremenskih intervala (15, 30, 45, 60 i 75 min), zagrevanjem na temperaturu od $250 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno na temperaturu pri kojoj dolazi do gubitka i poslednjeg molekula vode iz kristalne rešetke

na osnovu TGA analize. Teorijski gubitak mase do koga dolazi usled gubitka jednog molekula H_2O iz $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ tokom ovog zagrevanja iznosi 10,14%. Dostizanje ove vrednosti pokazuje da je materijal sušen u fluidizovanom sloju pri pomenutim temperaturnim uslovima zaista monohidrat, $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Kao što se sa slike 10 može videti, ova vrednost je dostignuta posle 60 min sušenja, na osnovu čega je zaključeno da minimalno vreme boravka u sušnici treba da iznosi 60 min.



Slika 10. Kriva sušenja za čestice uzorka 1, srednjeg prečnika 0,5 mm.
Figure 10. Drying curve of the sample 1, with mean diameter 0.5 mm.

Rezultati proračuna

Nakon završenih laboratorijskih ispitivanja kojima je utvrđeno da čestice srednjeg prečnika 0,17 mm ne fluidizuju, dalji proračuni su nastavljeni za čestice sa krupnijom granulacijom srednjeg prečnika 0,5 mm i za kolonu kružnog poprečnog preseka.

Dimenzije sušnice izračunavaju se postavljanjem energetskog bilansa procesa uz pretpostavku da se toplota koja se dovede u sušnicu zagrejanim vazduhom predaje vlažnom materijalu i utroši na zagrevanje suve materije i vlage, kao i na uparavanje jednog dela vlage:

$$\begin{aligned} (1 - F_{gub}) \rho_g U_g c_{pg} \Delta T_g A_c &= \\ = (\dot{m}_{sm} c_{psm} + \Delta \dot{m}_w c_{pw}) \Delta T_{vm} + \Delta \dot{m}_w r_w \end{aligned} \quad (6)$$

gde je F_{gub} faktor gubitka toplote u okolinu, za koju je usvojena iskustvena vrednost 0,05. ρ_g , U_g i c_{pg} su gustina gasa, površinska brzina gasa i specifični toplotni kapacitet gasa, redom. ΔT_g je razlika temperature gasa na ulazu u kolonu T_u i temperature sušenja T_s ; A_c je površina poprečnog preseka kolone, \dot{m}_{sm} je maseni protok osušenog materijala. c_{psm} i c_{pw} su specifični toplotni kapaciteti suvog materijala odnosno vlage. ΔT_{vm} je razlika temperature sušenja i temperature vlažnog materijala na ulazu u sušnicu koja je u ovom proračunu iznosila $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta \dot{m}_w$ je količina isparene vlage u

jedinici vremena a r_w je latentna toplota isparavanja vode.

Minimalna brzina fluidizacije jedna je od najvažnijih karakteristika procesa fluidizacije. Izračunava se iz Ergunove jednačine [7]:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu_g}{\varepsilon_{mf}^3 d_p^2} U_{mf} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_{mf} \rho_g}{\varepsilon_{mf} d_p} U_{mf}^2 = (7)$$

$$= (1 - \varepsilon_{mf}) g (\rho_p - \rho_g)$$

gde je ε_{mf} poroznost sloja u stanju minimalne fluidizacije, ρ_g i μ_g su gustina i viskoznost gasa, U_{mf} je minimalna brzina fluidizacije, dok su d_p i ρ_p prečnik i gustina čestica, redom. Druga karakteristična brzina u fluidizacionim sistemima je brzina taloženja usamljene čestice, U_t , koja se se naziva i brzinom odnošenja. Za sitne čestice možemo pretpostaviti laminarni režim taloženja čestica, te se brzina odnošenja (taloženja) može odrediti iz izraza [7]:

$$U_t = \sqrt{\frac{3,1 d_p g (\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (8)$$

U ovom radu za fluidizacioni broj U_g/U_{mf} , usvojena je vrednost 4, što znači da je za brzinu gasa usvojena četiri puta veća vrednost od minimalne brzine fluidizacije.

Nominalno vreme boravka vlažnog materijala u sušnici izračunava se prema jednačini:

$$\tau = \frac{m_s}{\dot{m}_{vm}} \quad (9)$$

gde je m_s statička masa sloja a \dot{m}_{vm} maseni protok vlažnog materijala, tj. bakar(II)-sulfat-pentahidrata. Za proizvodni kapacitet od 500 kg h⁻¹ bakar(II)-sulfat-monohidrata, maseni protok bakar(II)-sulfat-pentahidrata iznosi 702,5 kg h⁻¹. Na osnovu prethodno definisanih jednačina proračunata je neophodna količina agensa za sušenje (vazduha), utrošak toplote za zagrevanje agensa za sušenje sa ambijentalne temperature na 180 °C, kao i dimenzije kolone za proizvodnju 500 kg h⁻¹ bakar(II)-sulfat-monohidrata. Takođe, proračunate su i vrednosti specifične potrošnje vazduha i toplote neophodne za uklanjanje 1 kg vode.

Parametri neophodni za proračun kao i rezultati proračuna su prikazani u tabeli 2.

Izračunata vrednost minimalne brzine fluidizacije (0,214 m s⁻¹) je nešto veća od minimalne brzine fluidizacije dobijene iz eksperimentalnih ispitivanja (slika 9). Do ove razlike dolazi usled toga što je u proračunu minimalne brzine fluidizacije korišćena srednja vrednost prečnika čestica uzorka 2 od 0,5 mm. Granulometrijskom analizom je pokazano da uzorak 2 sadrži i sitnije čestice, kao što se može videti sa slike 4. Ove sitnije čestice počinju da fluidizuju pri brzinama nižim od

0,214 m s⁻¹, što se vidi iz eksperimentalne krive fluidizacije.

Za zadati proizvodni kapacitet neophodno je utrošiti 10309,1 kg h⁻¹ ambijentalnog vazduha za koji je za zagrevanje vazduha sa 10 na 180 °C potrebno utrošiti 494,1 kW toplote. Na osnovu jednačine (6) proračunata je neophodna površina poprečnog preseka kolone od 3,78 m², čime se za kolonu kružnog poprečnog preseka dobija prečnik kolone od 2,19 m. Za odnos visina/prečnik kolone uzeta je vrednost 3. Usvaja se statička visina sloja od 0,2 m, na osnovu čega se proračunava zapremina nasipnog sloja, odnosno statička masa sloja. Iz jednačine (9) proračunato je nominalno vreme boravka od 1,42 h što je dovoljno vreme da se obavi proces sušenja.

Proračun iz Super Pro Designer programskog paketa

U programskom paketu Super Pro Designer moguće je izvršiti materijalno bilansiranje sušnice sa fluidizovanim slojem. Na slici 11 prikazan je izgled prozora iz programskog softvera Super Pro Designer 5.1.

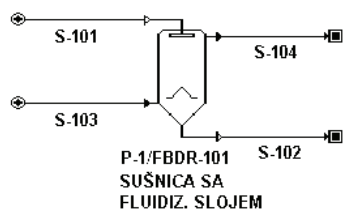
Za potrebe proračuna neophodno je zadati sledeće parametre: ulaznu i izlaznu temperaturu materijala, ulaznu temperaturu agensa za sušenje, protok materijala na ulasku u sušnicu i brzinu isparavanja vlage po jedinici zapremine, za koju je iz literature preuzeta iskustvena vrednost od 40 kgH₂O/(h m³) [5]. Ostali parametri imaju vrednosti date u tabeli 2. Kao izlazne podatke softver proračunava maseni protok agensa za sušenje, maseni protok osušenog materijala kao i dimenzije kolone (prečnik i visinu). U tabeli 3 su prikazani rezultati dobijeni bilansiranjem sušnice u fluidizovanom sloju u softverskom paketu Super Pro designer. Prilikom proračuna dimenzije kolone usvojen je odnos visine i prečnika vrednosti 3, što je bila vrednost preporučena u softveru.

Ovaj softver takođe pruža mogućnost ekonomske evaluacije uređaja na bazi zadatih cena materijala i opreme postrojenja. Ako se ove cene preuzmu iz samog softvera procenjena vrednost proračunate sušnice u fluidizovanom sloju iznosi 67393 \$.

Poređenjem rezultata dobijenih u Super Pro Designer programskom softveru i rezultata prikazanih u tabeli 2, zapaža se da se vrednosti neophodnog masenog protoka vazduha za sušenje dobijene na bazi prethodno definisanih jednačina i primenjenog softvera jako malo razlikuju. Značajnije razlike se dobijaju u dimenzijama sušnice. Imajući u vidu da je prečnik kolone iz Super Pro Designer značajno manji, a vrednosti masenog protoka vazduha vrlo slične, to znači da će brzina vazduha u ovakvoj koloni biti značajno veća (oko 2,8 m s⁻¹). Treba napomenuti da se kao ulazni podatak za proračun u Super Pro Designer unosi vrednost prečnika čestica, ali nije moguće uneti raspodelu veličina čestica polidisperzne smeše. Zato su i rezultati proračuna iz ovog programskog paketa direktno primenljivi

Tabela 2. Termofizički parametri čestica i vazduha [12,13] i rezultati proračuna za čestice $d_{p,sr} = 0,5\text{mm}$ Table 2. Thermophysical parameters of particles and air [12,13] and the results of calculations for the particles of $d_{p,av} = 0.5\text{mm}$

Parametar	Vrednost	Jedinica
Usvojeni procesni parametri		
Ulazna temperatura vazduha T_u	180	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura sušenja T_s	120	$^{\circ}\text{C}$
Fluidizacioni broj U_g/U_{mf}	4	–
Karakteristike čestica $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		
Gustina čestica ρ_p	2284	kg m^{-3}
Statička poroznost sloja ϵ_0	0,42	–
Nasipna gustina čestica ρ_{pbulk}	1325	kg m^{-3}
Specifični toplotni kapacitet suve materije c_{psm}	0,8	$\text{kJ (kg }^{\circ}\text{C)}^{-1}$
Karakteristike tečne faze		
Specifični toplotni kapacitet vode c_{pw}	4,189	$\text{kJ (kg }^{\circ}\text{C)}^{-1}$
Latentna toplota isparavanja vode r_w	2268	$\text{kJ (kg }^{\circ}\text{C)}^{-1}$
Karakteristike fluidizovanog sloja		
Poroznost u stanju minimalne fluidizacije ϵ_{mf}	0,43	–
Gustina vazduha na temperaturi sušenja ρ_g	0,8858	kg m^{-3}
Viskoznoost vazduha na temperaturi sušenja μ_g	$2,241 \cdot 10^{-5}$	Pa s
Specifični toplotni kapacitet suvog vazduha c_{pg}	1,015	$\text{kJ (kg }^{\circ}\text{C)}^{-1}$
Minimalna brzina fluidizacije na temperaturi sušenja U_{mf}	0,214	m s^{-1}
Površinska brzina vazduha na temperaturi sušenja U_g	0,86	m s^{-1}
Brzina taloženja Ut	6,20	m s^{-1}
Dimenzije kolone za fluidizaciju		
Faktor gubitka toplote u okolinu, F_g	0,05	–
Potrebna površina kolone A_c	3,78	m^2
Prečnik kolone D_c	2,19	m
Visina kolone H	6,58	m
Usvojena visina sloja H_{us}	0,20	m
Zapremina nasipnog sloja V_n	0,76	m^3
Statička masa sloja m_s	1001,2	kg
Nominalno vreme boravka τ	1,42	h
Utrošak vazduha i toplote		
Maseni protok vazduha \dot{m}_g	2,86	kg s^{-1}
Maseni protok vazduha po času	10309,1	kg s^{-1}
Utrošak toplote Q	494,1	kW
Specifična potrošnja toplote q	8787	$\text{kJ (kg H}_2\text{O)}^{-1}$
Specifična potrošnja vazduha L	50,92	$\text{kJ (kg H}_2\text{O)}^{-1}$



Slika 11. Sušnica sa fluidizovanim slojem u Super Pro Designer, gde su S-101 i S-102 ulazna i izlazna struja materijala, S-103 i S-104 ulazna i izlazna struja vazduha za sušenje.
Figure 11. Fluidized bed dryer from Super Pro Designer, where S-101 and S-102 denote input and output streams of drying material, S-103 and S-104 denote input and output streams of drying air.

Tabela 3. Maseni protok vazduha i proračunate dimenzije kolone za sušenje bakar(II)-sulfat-pentahidrata u programskom paketu Super Pro Designer
Table 3. Air mass flow and size of the drying column for copper (II) sulfate pentahydrate calculated by Super Pro Designer

Parametar	Vrednost	Jedinica
Maseni protok svežeg vazduha	10116,0	kg h^{-1}
Maseni protok osušenog proizvoda	500,18	kg h^{-1}
Prečnik kolone	1,29	m
Visina kolone	3,87	m

na monodisperzne materijale, dok je za njihovu primenu na polidisperzne smeše potrebno prilagoditi brzine vazduha za sušenje, da ne bi došlo do odnošenja velikog broja sitnijih čestica iz sloja.

Proračun iz Simprosys programskog paketa

U programskom paketu Simprosys 3.0 je moguće izvršiti materijalno i energetske bilansiranje čitavog postrojenja za sušenje. Na slici 12 je šematski prikazano postrojenje za sušenje bakar(II)-sulfat-pentahidrata koji pored sušnice i grejača uključuje i uređaje za pripremu agensa za sušenje kao i za njegovo prečišćavanje od zaostalih čestica pre njegovog ispuštanja u atmosferu. Na istoj šemi je prikazana i mogućnost mešanja dela vazduha iskorišćenog za sušenje sa ambijentalnim vazduhom u cilju povećanja energetske efikasnosti procesa. Nedostatak ovog programskog paketa je što ne uzima u obzir konstruktivne karakteristike sušnice, kao ni kinetiku procesa sušenja, što ograničava njegovu primenu samo na materijalno i energetske bilansiranje procesa.

Ambijentalni vazduh (gas 1) ulazi u ventilator nakon koga se meša sa delom struje iskorišćenog vazduha (gas 10). Tako nastala smeša vlažnog vazduha (gas 3) ulazi u grejač u kome se zagreva na $180\text{ }^\circ\text{C}$ čime je spreman za sušenje. Nakon sušnice, iskorišćeni vazduh (gas 5) prolazi kroz ciklon i filter za vazduh u kojima se prečišćava od čestica koje su odnete strujom vazduha. Nakon filtra za vazduh, deo iskorišćenog vazduha odlazi u atmosferu (gas 8), a deo se recirkuliše i meša sa strujom svežeg vadauha.

Poznato je da procesi sušenja spadaju u termički veoma zahtevne procese. U cilju povećanja energetske efikasnosti procesa sušenja često se vazduh koji izlazi iz sušnice ponovo vraća u proces kada to njegovi procesni parametri (temperatura i sadržaj vlage) dozvoljavaju. S obzirom da u ovom slučaju vazduh iz sušnice izlazi na $120\text{ }^\circ\text{C}$ a da ambijentalni vazduh ulazi na $10\text{ }^\circ\text{C}$, njihovim mešanjem u odgovarajućem odnosu potreba za toplotom razmenjenom u grejaču će se smanjiti. U tabeli 4 dat je uporedni prikaz potrebne količine ambijentalnog vazduha i utroška toplote na grejaču za slučaj da se u postrojenju obavlja: i) proces bez recirkulacije

vazduha, ii) proces u kome se 30% iskorišćenog vazduha vraća u proces i iii) proces u kome se 70% iskorišćenog vazduha vraća u proces i pre grejača meša sa svežim vazduhom.

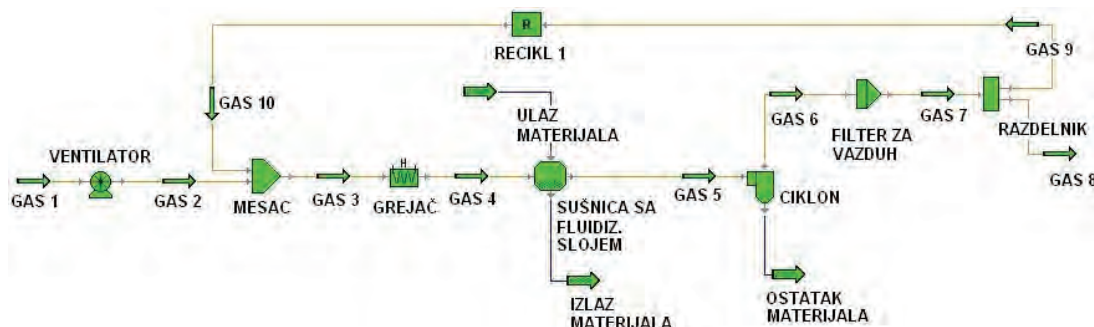
Tabela 4. Rezultati materijalnog i energetskog bilansiranja procesa sušenja bakar(II)-sulfat-pentahidrata u programskom paketu Simprosys

Table 4. Material and energy balancing of the drying process of copper (II) sulfate pentahydrate in the software package Simprosys

Parametar	Vrednost	Jedinica
Proces bez recirkulacije vazduha		
Maseni protok svežeg vazduha	12426,4	kg h^{-1}
Utrošak toplote	591,5	kW
Proces sa recirkulacijom 30% vazduha		
Maseni protok svežeg vazduha	8490,1	kg h^{-1}
Utrošak toplote	453,2	kW
Proces sa recirkulacijom 70% vazduha		
Maseni protok svežeg vazduha	3479,2	kg h^{-1}
Utrošak toplote	384,0	kW

Na osnovu rezultata iz Tabele 4 zapaža se da se toplota najmanje troši pri procesu recirkulacije vazduha od 70% i da je tada potreban najmanji protok vazduha na ulazu u postrojenje. Najveća potrošnja toplote se javlja u slučaju bez recirkulacije, tako da ukoliko želimo da smanjimo taj utrošak, najbolje je konstruisati postrojenje sa recirkulacijom.

Poređenjem rezultata koje daje Symprosis sa prethodno analiziranim pristupima zapaža se da je za proces bez recirkulacije vazduha u Symprosis-u proračunata oko 20% veća količina agensa za sušenje ($12426,4\text{ kg h}^{-1}$) nego što je to bio slučaj kod računskog proračuna ($10309,1\text{ kg h}^{-1}$) i Super Pro Designera ($10116,0$). Kao posledica zahtevane veće količine vazduha i iznos toplote je veći za oko 20%. Imajući u vidu da primenjeni programski paketi ne daju metodologiju proračuna ne može se pouzdano utvrditi uzrok odstupanja u rezultatima.



Slika 12. Šema procesa sušenja vlažnog materijala uz recirkulaciju agensa za sušenje iz programskog paketa Simprosys. Figure 12. Scheme of the drying process with a recirculation of the drying agent from the Simprosys software package.

ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitan je proces sušenja bakar(II)-sulfat-pentahidrata do bakar(II)-sulfat-monohidrata. Rezultati TGA-analize ukazali su da je za proces sušenja optimalna temperatura od 180 °C i da sušenje kraće traje ukoliko je uzorak krupnije granulacije. Za uzorak pentahidrata čije su čestice srednjeg prečnika 0,5 mm, monohidrat se dobija za 35 min. U laboratorijskoj koloni sa fluidizovanim slojem ispitane su fluidizacione karakteristike materijala i određena je kriva sušenja. Eksperimentima je potvrđeno da čestice iz uzorka $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ sitnije granulacije ne fluidizuju, tako da su u daljim proračunima posmatrane samo krupnije čestice. Nakon laboratorijskih eksperimenata izvršeno je materijalno i energetsko bilansiranje realnog postrojenja sa kapacitetom proizvodnje od 300 t mesečno tj. 500 kg h^{-1} bakar(II)-sulfat-monohidrata. Proračuni neophodne količine agensa za sušenje i dimenzija postrojenja izvršeni su korišćenjem programskih paketa SuperPro Designer i Simprosys. Takođe, analizirana je i mogućnost recirkulacije agensa za sušenje. Na osnovu postavljenih bilansnih jednačina doobijene su približno jednake vrednost masenog protoka agensa za sušenje kao i primenom Super Pro Designer softvera, ali se dimenzije kolone značajno razlikuju. Sa druge strane Symprosis daje za oko 20% veće masene protoke vazduha i zahtevane količine toplote za njegovo zagrevanje u odnosu na računski proračun i Super Pro Designer. Potvrdilo se očekivano da se sa povećanjem količine povratnog vazduha potreba za toplotom koja se dovodi u grejaču za zagrevanje ambijentalnog vazduha smanjuje.

U ovom radu se pokazalo da je jedino eksperimentalnim merenjima moguće proveriti i potvrditi realno ponašanje određenog sistema. Iako je na osnovu Geldartove klasifikacije zaključeno da čestice iz uzorka sitnije granulacije imaju dobre fluidizacione karakteristike, eksperimentalno je potvrđeno da ove čestice ne mogu fluidizovati, čime je potvrđena važnost ispitivanja u laboratorijskim i pilot postrojenjima. Sa druge strane,

neslaganje u rezultatima koji su dobijeni primenom tri različita pristupa u bilansiranju i projektovanju sušnice navode na zaključak da je za utvrđivanje pouzdanosti komercijalnih softvera za projektovanja novih postrojenja neophodno prethodno testirati što veći broj različitih realnih industrijskih procesa.

LITERATURA

- [1] A.D. Haris, L.H. Kalbus, Decomposition of copper(II) sulfate pentahydrate: A sequential gravimetric analysis, *J. Chem. Edu.* **56** (1979) 417.
- [2] R.L. White, Variable temperature infrared study of copper sulfate pentahydrate dehydration, *Thermochim. Acta* **528** (2012) 58–62.
- [3] G.B. Frost, R.A. Campbell, The rate of dehydration of copper sulphate pentahydrate at low pressures of water vapor, *Chin. J. Chem.* **31** (1953) 107–119.
- [4] J.J.M. Órfão, F.G. Martins, Kinetic analysis of thermogravimetric data obtained under linear temperature programming – A method based on calculations of the temperature integral by interpolation, *Thermochim. Acta* **390** (2002) 195–211.
- [5] V. Valent, Sušenje u procesnoj industriji, TMF, Beograd, 2001.
- [6] A. S. Mujumdar, (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3rd ed., Taylor & Francis, New York, 2006.
- [7] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1969.
- [8] D. Geldart, Types of Gas Fluidization, *Powder Technol.* **7** (1973) 285–292.
- [9] Simprosys 3.0, Simprotec corporation, USA, 2013.
- [10] Super Pro Designer 5.1, Intelligen, USA, 1991.
- [11] T.I. Taylor, H.P. Klug, Thermal transitions in copper sulphate pentahydrate molecular rotation and the dehydration of hydrates, *J. Chem. Phys.* (1936) 601–607.
- [12] B. Djordjević, V. Valent, S. Šerbanović, M. Kijevčanin *Termodinamika, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2012.*
- [13] B. Djordjević, S. Šerbanović, A. Tasić, E. Živković, M. Kijevčanin, V. Valent, *Toplotne operacije, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2013.*

SUMMARY

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THE COPPER (II) SULPHATE MONOHYDRATE FROM COPPER (II) SULPHATE PENTAHYDRATE PRODUCTION PROCESS IN A FLUIDIZED BED DRYER

Tatjana Kaluđerović Radoičić, Ivona Radović, Marija Ivanović, Nevenka Rajić, Željko Grbavčić

University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

(Professional paper)

In this paper the process of the copper (II) sulphate monohydrate from copper (II) sulphate pentahydrate (also known as a Blue vitriol or Bluestone) production was analyzed. Copper (II) sulphate pentahydrate is one of the most important copper salts which has been known since the ancient Egyptians. In the nineteenth century its application as a fungicide was discovered which provoked wide industrial production. Molecule of the copper (II) sulphate pentahydrate is a crystalhydrate with five water molecules linked by chemical bonds to a molecule of the copper (II) sulphate. Copper (II) sulphate exists as a series of compounds that differ in their degree of hydratation. The anhydrous form is a pale green or gray–white powder, whereas the pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), the most commonly encountered salt, is bright blue. In order to obtain copper (II) sulphate monohydrate from copper (II) sulphate pentahydrate, it is necessary to remove four water molecules. To determine the optimum temperature and time required for the removal of four water molecules from a molecule of pentahydrate in this work thermogravimetric (TGA) analysis was performed. Thermogravimetric (TGA) analysis – dehydration of copper (II) sulphate pentahydrate is done using simultaneous TG–DSC thermal analyzer DTG-Q600 SDT from TA Instruments. Analysis was carried out for two types of samples, the samples containing particles of the average diameter equal to 0.17 mm and the particles of the average diameter 0.5 mm. In addition, fluidization and drying curve were determined using a semi-industrial fluidization column. On the top, the industrial fluidization column, aimed to produce 300 tonnes per month of copper (II) sulphate monohydrate, was designed. Material and energy calculations were performed using software packages Simprosys 3.0 and SuperPro Designer 5.1. Simprosys 3.0 is a software package designed for the modeling and simulation of a drying process, as well as for 20 different unit operations. SuperPro Designer 5.1 facilitates modeling, evaluation and optimization of different industrial processes including drying. These software packages were applied for the calculation of the air flow rate, heat exchange and for the scoping of a dryer.

Keywords: Fluidized bed drying • Copper(II) sulphate pentahydrate • Copper(II) sulphate monohydrate • TGA analysis