

TERMIČKI PRORAČUN VERTIKALNE SUŠARE ZA SUŠENJE ZRNASTIH MATERIJALA U PREDUZEĆU “ŽITAR”, SEČANJ

THERMAL CALCULATION OF VERTICAL DRYER FOR DRYING GRAIN MATERIALS IN COMPANY “ŽITAR”, SEČANJ

Duško SALEMOVIĆ*¹, Matilda LAZIĆ¹, Aleksandar DEDIĆ², Dragan HALAS¹

¹ Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija

² Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd Srbija

U radu je izvršen termički proračun vertikalne sušare za sušenje zrnastih materijala u preduzeću “Žitar”, Sečanj. Po konstrukciji, sušara je sa dvostrukim prolazom materijala za sušenje i to, kroz prvu i drugu zonu sušenja. Sušenje materijala se u drugoj zoni vrši svežim, vrelim vazduhom, koji se pre ulaska u prvu zonu sušenja, meša sa delom zagrejanog vazduha poreklom iz zone hlađenja osušenog materijala. U radu su kao ulazne promenljive za predmetni proračun, korišćene stvarno izmerene vrednosti fizičkih i termičkih veličina tokom sušenja. Na osnovu njih je izvršen proračun preostalih veličina neophodnih za ucrtavanje toka procesa sušenja po zonama sušenja u tzv. “i-x” dijagramu za vlažan vazduh. Dobijeni podaci iz “i-x” dijagrama, a na osnovu termičkog proračuna, koriste se za svakodnevno praćenje i kontrolu rada sušare po zonama sušenja. Razmatrana izvedba procesa sušenja omogućava rekuperaciju toplote iz zone hlađenja osušenog materijala (na račun zagrevanja dela vazduha potrebnog za sušenje). Pogodna konstrukcija sušare sa dve zone sušenja materijala značajno utiče na režim rada sušare kao i na uštedu ukupne količine toplote za sušenje materijala.

Ključne reči: termički proračun; vertikalna sušara; zone sušenja; dijagram toka procesa sušenja

In this paper, a thermal calculation of a vertical dryer for drying grain materials in the company “Žitar”, Sečanj, was performed. By design, the dryer has a double passage of drying material through the first and second drying zones. Drying of the material in the second zone is carried out by fresh, hot air, which, before entering the first drying zone, is mixed with some of the heated air originating in the cooling zone of the dried material. On the basis of them, the calculation of the remaining sizes, necessary for plotting the flow of the drying process by drying zones in the so-called “i-x” diagram for wet air. The data obtained from the “i-x” diagram, based on the thermal calculation, are used for daily monitoring and control of the dryer operation by drying zones. In this paper, the specified measured values of physical and thermal quantities during drying were used as specified variables for the subject calculation. Suitable design of a two-zone dryer material significantly affects the mode of operation of the dryer as well as saving the total amount of heat for drying the material.

Key words: thermal calculation; vertical dryer; drying zone, diagram of drying process

1 Uvod

Sušenje je toplotno-difuziona operacija, koja se veoma često primenjuje u procesnoj industriji. Sušenjem zrnastih materijala postiže se maseni udeo vlage zahtevan za dalju preradu žitarica u preduzeću “Žitar”, Sečanj. Sušenje se sastoji u tome da se zrnu oduzme određena količina vlage jer se zrno sa povećanom količinom vlage ne može skladištiti na adekvatan način. Nedovoljno osušena sirovina tokom skladištenja, pre prerade, gubi zahtevana kvalitativnih svojstava ali izaziva i nepoželjan uticaja na procesne uređaje i opremu. Suštinski, za vreme sušenja u sušari, zrno se zagreva i dolazi do isparavanja vode sa površine zrna a isparena vlaga nadoknađuje se vlagom iz unutrašnjosti zrna. Brzina sušenja uslovljena je brzinom prodiranja vlage iz unutrašnjosti zrna. Pri suviše velikoj brzini sušenja, brzina isparavanja vlage sa površine zrna je viša nego brzina prodiranja vlage iz unu-

* Corresponding author, e-mail: duskosalemovic@gmail.com

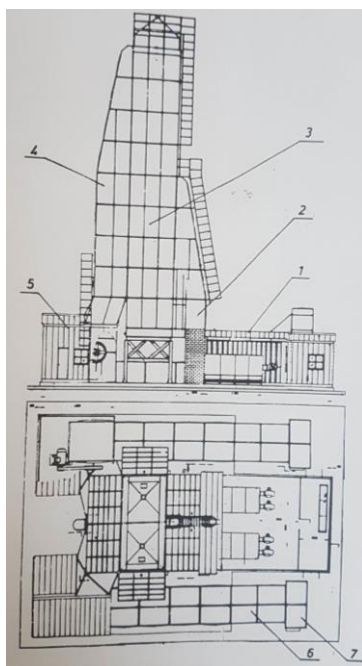
trašnosti zrna što dovodi do presušivanja površine zrna, zatvaranja pora i otežavanja sušenja, uz moguću nagorelost zrna [1]. Zato se se zrno pre početka sušenja u sušari mora zagrejati da bi se smanjila i uravnotežila brzina njegovog sušenja. Važno je prema tome, ne presušivati zrno ispod ravnotežne vlažnosti jer se time nepotrebno povećavaju troškovi sušenja i rada sušare [1,2,3].

Pod režimom sušenja podrazumeva se izbor osnovnih parametara, koji određuju proces sušenja zrna. Režim sušenja obično karakterišu: temperatura zrna i relativna vlažnost vazduha za sušenje na ulazu u sušaru, temperatura zagrevanja/sušenja zrna u sušari, kao i izlazna temperatura i vlažnost zrna ali vazduha. Optimalni režim sušenja je onaj, pri kome se obavlja proces sušenja za najkraće vreme i sa najmanjim utroškom toplote a da se pri tome sačuva kvalitet zrna [1,2]. Režim sušenja se postavlja u zavisnosti od početne vlažnosti zrna, vrste zrna, konstrukcije sušare, itd.

U ovom radu je izvršen kontrolni termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare tipa DVSZ-9 za sušenje zrnastih materijala u preduzeću “Žitar”, Sečanj. Ulazne promenljive za proračun su preuzete iz tehničko-tehnološke dokumentacije sušare, prema literaturi [4,5]. Na osnovu tih podataka izvršen je proračun preostalih nepoznatih veličina, koje je bilo potrebno izračunati da bi se realizovao predmetni proračun. Predpostavljeno je da se rezultati kontrolnog termičkog proračuna odnosno, sve relevantne termodinamičke veličine, neophodne za praćenje procesa sušenja, uspešno mogu predstaviti u “ i_v-x_v ” dijagramu.

2 Proces sušenja i konstrukcija vertikalne sušare za sušenje zrnastih materijala u preduzeću “Žitar”, Sečanj

Dvoprolazna vertikalna sušara je tipa DVSZ-9 i u preduzeću “Žitar”, Sečanj služi za sušenje žitarica (sirovina za dalju preradu). Projektovana je od strane preduzeća “Pobeda-Imo” iz Novog Sada [4]. Sušenje materijala se odvija u gornjoj i donjoj zoni sušenja. Radi rekuperacije toplote iz zone hlađenja materijala (donja zona sušenja) sušara je konstruisana tako da se pre ulaza u gornju zonu sušenja, izvodi dogrevanje izlaznog vazduha iz donje zone i to, procesom mešanja sa zagrejanim vazduhom iz zone hlađenja (zona mešanja dve vazdušne struje). Sušara je projektovana u cilju usavršavanja jednoprolazne sušare, koja je bila instalisana u istom preduzeću. Konstrukcijom dvoprolazne vertikalne sušare tipa DVSZ-9 za zrnasti materijal (Slika 1.) postignuto je smanjenje specifične potrošnje toplote, povećanje kapaciteta rada, sprečavanje problema niskotemperaturne korozije u odnosu na jednoprolazu sušaru [4]. Ovakva izvedba sušare poboljšava efikasnost prijema vlage iz materijala u gornjoj zoni sušenja [4] u odnosu na konstrukciju sa jednim prolazom.



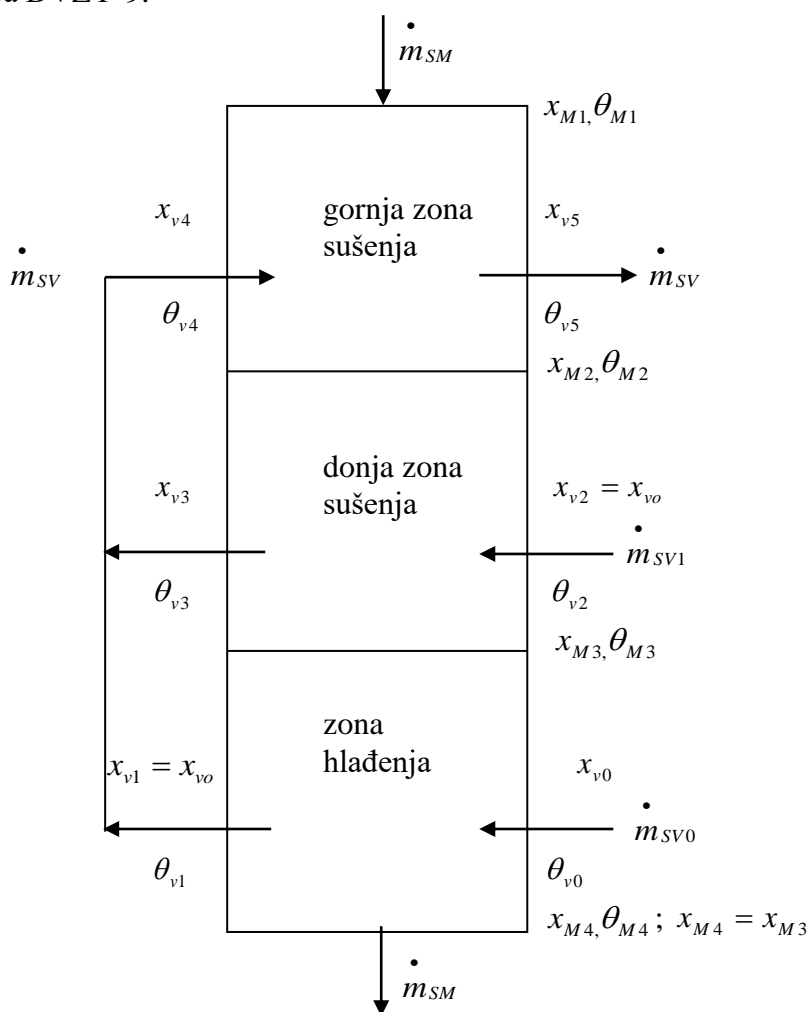
Slika 1. Konstrukcija dvoprolazne vertikalne sušare za zrnasti materijal tipa DVSZ-9 u preduzeću “Žitar”, Sečanj

Zagrejani vazduh iz mašinske kućice (1) prolazi kroz ulazni kanal (2) sušare (Slika 1.) i struji kroz sloj zrna. Nakon prolaska kroz sloj materijala, vazduh izlazi u bočni kanal (3) i prolazi kroz sloj zrna u četiri gornje kaskade iz kojih odlazi u izlazni kanal (4). Tako iskorišćeni vazduh za sušenje, zasićen vlagom i plevom, ventilatorom biva usisan u ventilatorsku kućicu. Iz ventilatorske kućice se potiskuje kroz spojni kanal (6) na suvi hvatač pleve (7). Deo vazduha, koji prolazi kroz zonu hlađenja, zagreje se oduzimajući toplotu toplom zrnu koje se hladi. Potom odlazi u bočni kanal (3) i meša se sa ulazni, svežim vazduhom.

3 Termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare za zrnasti material tipa DVSZ-9

U ovom poglavlju rada će biti izvršen kontrolni termički proračun vertikalne dvoprolazne sušare tipa DVSZ-9 za sušenje žitarica u preduzeću "Žitar", Sečanj. Biće takođe, dat pregled svih ulaznih veličina za proračun na osnovu podataka iz Tehničko-tehnološke dokumentacije preduzeća [4]. i izračunate sve preostale nepoznate veličine, potrebne za predmetni proračun [5,6].

Na Slici 2. [4,5] prikazan je pregled svih relevantnih veličina za termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare tipa DVZY-9.



Slika 2. Relevantne veličine za termički proračun procesa sušenja u dvoprolaznoj vertikalnoj sušari tipa DVSZ-9

3.1 Pregled ulaznih promenljivih za termički proračun procesa sušenja u dvoprolaznoj vertikalnoj sušari tipa DVSZ-9

Za predmetni kontrolni, termički proračun, korišćene su ulazne promenljive preuzete iz literature [4,5] koje su prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1. Korišćene ulazne promenljive za termički proračun vertikalne sušare tipa DVSZ-9

Promenljiva	Vrednost	Jedinica	Opis
\dot{m}_{sv}	54	kg/s	maseni protok suvog vazduha u gornjoj zoni sušenja
\dot{m}_{sv1}	46,5	kg/s	maseni protok suvog vazduha u donjoj zoni sušenja
\dot{m}_{sv0}	7,5	kg/s	maseni protok suvog vazduha u zoni hlađenja
\dot{m}_{SM}	3,5	kg/s	maseni protok suvog materijala
x_{v0}	0,007	kg _{vp} /kg _{sv}	apsolutna vlažnost vazduha na ulazu u zonu hlađenja
x_{v1}	0,007	kg _{vp} /kg _{sv}	apsolutna vlažnost vazduha na izlazu iz zone hlađenja
x_{v2}	0,007	kg _{vp} /kg _{sv}	apsolutna vlažnost vazduha na ulazu u donju zonu sušenja
x_{v4}	0,02	kg _{vp} /kg _{sv}	apsolutna vlažnost vazduha na ulazu u gornju zonu sušenja
x_{v5}	0,025	kg _{vp} /kg _{sv}	apsolutna vlažnost vazduha na izlazu iz gornje zone sušenja
θ_{V0}	10,5	°C	temperatura vlažnog vazduha na ulazu u zonu hlađenja
θ_{V1}	20	°C	temperatura vlažnog vazduha na izlazu iz zone hlađenja
θ_{V2}	102	°C	temperatura vlažnog vazduha na ulazu u donju zonu sušenja
θ_{V4}	56,5	°C	temperatura vlažnog vazduha na ulazu u gornju zonu sušenja
θ_{V5}	40,5	°C	temperatura vlažnog vazduha na izlazu iz gornje zone sušenja
x_{M1}	0,36	kg _{wl} /kg _{sm}	apsolutna vlažnost materijala na ulazu u sušaru
θ_{M1}	12	°C	temperatura materijala na ulazu u sušaru

3.2 Proračun nepoznatih veličina u procesu sušenja u dvoprolaznoj vertikalnoj sušari DVSZ-9

U ovom poglavlju rada su izračunate preostale, nepoznate veličine za kontrolni, termički proračun procesa sušenja u dvoprolaznoj vertikalnoj sušari tipa DVSZ-9. Izračunavanje je izvedeno korišćenjem formula iz literature [5,6].

3.2.1 Gornja zona sušenja

Prema materijalnom bilansu gornje zone sušenja (jednačina (1)) važi:

$$\dot{m}_{sv} \cdot (x_{v5} - x_{v4}) = \dot{m}_{SM} \cdot (x_{M1} - x_{M2}) \quad (1)$$

Iz jednačine (1) izračunava se apsolutna vlažnost materijala na izlazu iz gornje zone sušenja- x_{M2} na sledeći način (jednačina (2)):

$$x_{M2} = x_{M1} - \frac{\dot{m}_{sv}}{\dot{m}_{SM}} \cdot (x_{v5} - x_{v4}) = 0,283 \text{ kg}_{wl}/\text{kg}_{SM} \quad (2)$$

Toplotni bilans gornje zone sušenja prikazan je jednačinom (3) iz koje se izračunava toplotni protok- \dot{Q}_1 (jednačina (4)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{sv} \cdot [(c_{psv} + x_{v4} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v4} + x_{v4} \cdot r_0] - \dot{Q}_1 = \dot{m}_{sv} \cdot [(c_{psv} + x_{v5} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v5} + x_{v5} \cdot r_0] \quad (3)$$

$$\dot{Q}_1 = 200801,7 \text{ W} \quad (4)$$

Iz bilansne jednačine (5) izračunava se temperatura materijala na izlazu iz gornje zone sušenja- θ_{M2} (jednačina (6)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M2} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M1} + \dot{Q}_1 = \dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M2} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M2} \quad (5)$$

$$\theta_{M2} = 36,05 \text{ }^\circ\text{C} \approx 36 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6)$$

3.2.2 Mešanje dve struje vazduha

Materijalni bilans procesa mešanja dve struje vazduha (dogrevanje vazduha za sušenje, reku-peracijom izlazne toplote osušenog materijala) prikazan je jednačinom (7) iz koje se izračunava apsolutna vlažnost vazduha u tački mešanja dve struje vazduha- x_{v3} (jednačina (8)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{sv0} \cdot x_{v1} + \dot{m}_{sv1} \cdot x_{v3} = \dot{m}_{sv} \cdot x_{v4} \quad (7)$$

$$x_{v3} = 0,022 \text{ kg}_{vp}/\text{kg}_{sv} \quad (8)$$

Toplotnim bilansom za mešanje dve struje vazduha (u cilju njegovog dogrevanja) prikazanim jednačinom (9) izračunava se temperatura vlažnog vazduha u tački mešanja dve struje- θ_{v3} (jednačina (10)), na sledeći način:

$$\dot{m}_{sv0} \cdot (c_{psv} + x_{v1} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v1} + \dot{m}_{sv1} \cdot (c_{psv} + x_{v3} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v3} = \dot{m}_{sv} \cdot (c_{psv} + x_{v4} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v4} \quad (9)$$

$$\theta_{v3} = 62,23 \text{ }^\circ\text{C} \approx 62 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10)$$

3.2.3 Donja zona sušenja

Iz jednačine materijalnog bilansa donje zone sušenja prikazane jednačinom (11) izračunava se apsolutna vlažnost materijala na izlazu iz donje zone sušenja- x_{M3} (jednačina (12)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{sv1} \cdot (x_{v3} - x_{v2}) = \dot{m}_{SM} \cdot (x_{M2} - x_{M3}) \quad (11)$$

$$x_{M3} = 0,084 \text{ kg}_{vp}/\text{kg}_{sv} \quad (12)$$

Iz jednačine toplotnog bilansa donje zone sušenja materijala prikazane jednačinom (13) izračunava se toplotni protok- \dot{Q}_2 (jednačina (14)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{sv1} \cdot [(c_{psv} + x_{v2} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v2} + x_{v2} \cdot r_0] - \dot{Q}_2 = \dot{m}_{sv1} \cdot [(c_{psv} + x_{v3} \cdot c_{pvvp}) \cdot \theta_{v3} + x_{v3} \cdot r_0] \quad (13)$$

$$\dot{Q}_2 = 60030 \text{ W} \quad (14)$$

Ako se toplotni bilans predstavi jednačinom (15) onda se može izračunati temperatura materijala na izlazu iz donje zone sušenja- θ_{M3} (jednačina (16)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M2} + \dot{Q}_2 = \dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M3} \quad (15)$$

$$\theta_{M3} = 46,81 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

3.2.4 Zona hlađenja

Prema materijalnom bilansu procesa hlađenja materijala (jednačine (17,18)) važi:

$$x_{v1} = x_{v0} \quad (17)$$

$$x_{M4} = x_{M3} \quad (18)$$

Iz jednačine toplotnog bilansa za vlažan vazduh (jednačina (19)) izračunava se toplotni protok- \dot{Q}_3 (jednačina (20)) na sledeći način:

$$\dot{m}_{svo} \cdot (c_{psv} + x_{v0} \cdot c_{pvp}) \cdot \theta_{v0} + \dot{Q}_3 = \dot{m}_{svo} \cdot (c_{psv} + x_{v0} \cdot c_{pvp}) \cdot \theta_{v1} \quad (19)$$

$$\dot{Q}_3 = 72177,6 \text{ W} \quad (20)$$

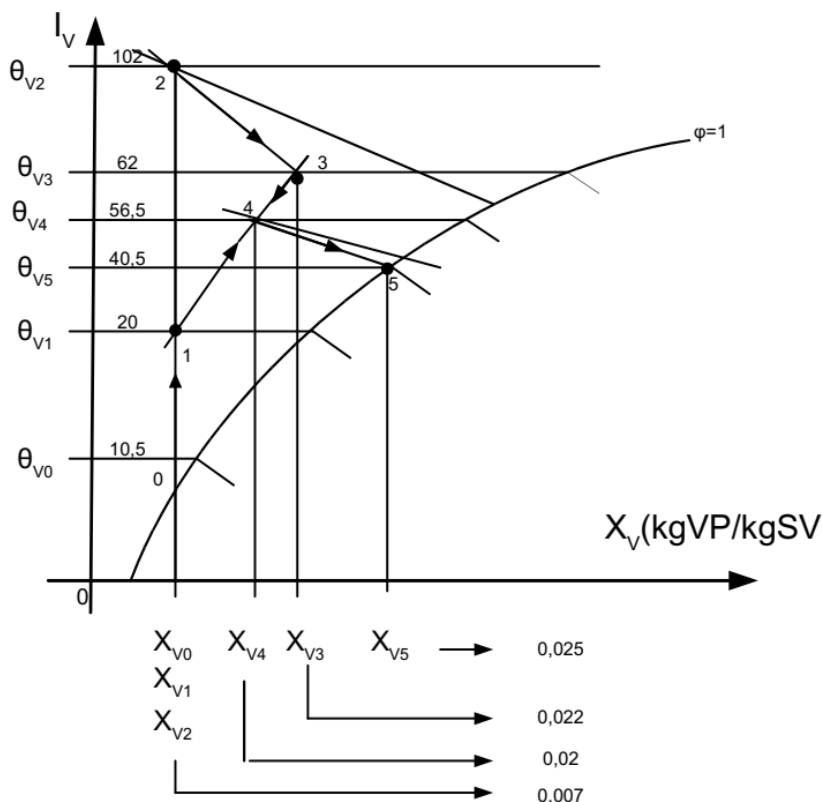
Ako se toplotni bilans za vlažan material predstavi jednačinom (21) onda se može izračunati temperatura materijala na izlazu iz zone hlađenja- θ_{M4} (jednačina 22) na sledeći način:

$$\dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M3} - \dot{Q}_3 = \dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M4} \quad (21)$$

$$\theta_{M4} = 34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (22)$$

Prema tome, θ_{M4} je ujedno, i izlazna temperatura osušenog materijala iz procesa sušenja.

Na osnovu izračunatih veličina u ovom poglavlju rada i korišćenjem ulaznih veličina (poglavljje 3.1) tok procesa sušenja u dvoprolaznoj vertikalnoj sušari tipa DVSZ-9, za sušenje žitarica u preduzeću “Žitar”, Sečanj, prikazan je u “i-x” dijagramu za vlažan vazduh (Slika 3).



Slika 3. Prikaz procesa sušenja po zonama u “i-x” dijagramu za vlažan vazduh

Sa Slike 3. se vidi izgled procesa sušenja vlažnog zrnastog materijala po zonama sušenja. Ceo proces sušenja se odvija u dve etape jer ima dve zone sušenja. Pre ulaska u gornju zonu sušenja vrši

se mešanje dve struje vazduha u cilju zagrevanja vazduha koji napušta donju zonu sušenja, što se vidi prikazom promena relevantnih veličina u "i-x" dijagramu. Dogrevanje se vrši toplim vazduhom iz zone hlađenja osušenog materijala koji je zagrejan rekuperacijom toplote, što se takođe, može pratiti promenom relevantnih veličina u "i-x" dijagramu.

4 Zaključak

Iz priloženog se vidi da se izgled procesa sušenja vlažnog, zrnastog materijala nezasićenim vlažnim vazduhom po zonama sušenja u sušari, uspešno prikazuje "i_v-x_v" dijagramom, što je u skladu sa pretpostavljenim. Ceo proces sušenja se odvija u onoliko etapa, koliko ima zona sušenja (preciznije, u dve zone). Pre ulaska u gornju zonu sušenja materijala, vrši se dogrevanje dela svežeg, nezasićenog vlažnog vazduha, koji se meša sa izlaznim nezasićenim vlažnim vazduhom iz donje zone sušenja. Na taj način se postiže povećanje efikasnosti prijema vlage iz materijala u gornjoj zoni sušenja, što je pokazano rezultatima izvedenog, kontrolnog termičkog proračuna. Takvom izvedbom konstrukcije posmatrane, dvoprolazne sušare omogućen je porast temperature na ulasku u gornju zonu sušenja u odnosu na izlaznu temperature vazduha iz donje zone sušenja (pri čemu se vlažnost znatno smanjuje) što konsekventno, rezultuje povećanom moći apsorpcije vlage iz materijala koji se suši. Promene vlažnosti materijala tokom celokupnog procesa sušenja su u skladu sa očekivanim promenama u "i_v-x_v" dijagramu. Promene relevantnih, termodinamičkih veličina predmetnog proračuna se prema navedenom, mogu pratiti sa pojedinačnih delova ili sa celokupno prikazanog dijagrama.

Interpretacija podataka u "i_v-x_v" dijagramu je uobičajena tehnika, koja se primenjuje za prikaz i kontrolu procesa sušenja zrnastih materijala jer omogućava jasno praćenje svih veličina, koje utiču na modelovanje/praćenje/optimizaciju procesa sušenja po zonama sušenja materijala u sušari a radi postizanja zahtevanog stepena suvoće zrna na izlazu iz sušare.

Zahvalnica

Rad je u okviru projekta tehnološkog razvoja podržan od strane MNTR.

5 References

- [1] **Žeželj, M.**, *Tehnologija žita i brašna, knjiga 1*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Novi Sad, SRJ, 1995.
- [2] **Stanišić, S.**, *Tehnološke operacije II (Toplotne I difuzione operacije)*, Jugoslovenski institut za prehrambeno inženjerstvo, Novi Sad, Jugoslavija, 1978.
- [3] **Topić, R.**, *Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara*, Naučna knjiga, Beograd, Jugoslavija, 1989.
- [4] *******, *Tehničko-Tehnološka i Projektna dokumentacija sušare DVSZ-9 za sušenje zrnastih materijala u preduzeću "Žitar" Sečanj*, Pobeda - Imo, Novi Sad, 1984.
- [5] **Salemović, D., Jašin, D.**, *Priručnik za procesnu tehniku*, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, R. Srbija, 2008.