



**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**

Autori: Duško Salemović, Matilda Lazić, Aleksandar Dedić, Dragan Halas



## 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 zahtevan kvalitet ali izaziva i nepoželjan uticaja na procesne uređaje i opremu. Važno je prema tome, ne presušivati zrno ispod ravnotežne vlažnosti jer se time nepotrebno povećavaju troškovi sušenja i rada sušare uz istovremeni negativan uticaj na kvalitet osušenog materijala
- 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. 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. Na osnovu tih podataka izvršen je proračun preostalih nepoznatih veličina, za realizaciju predmetnog proračuna. 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.



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

- Dvoprolazna vertikalna sušara (predmet ovog rada) je tipa DVSZ-9. U preduzeću “Žitar”, Sečanj služi za sušenje žitarica kao sirovina za dalju preradu. Projektovana je od strane preduzeća “Pobeda-Imo” iz Novog Sada. 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. Takvom konstrukcijom dvoprolazne vertikalne sušare tipa DVSZ-9 za zrnasti materijal postignuto je smanjenje specifične potrošnje toplote, povećanje kapaciteta rada, sprečavanje problema niskotemperaturne korozije u odnosu na jednoprolazu sušaru. Ovakva izvedba sušere poboljšava efikasnost prijema vlage iz materijala u gornjoj zoni sušenja u odnosu na konstrukciju sa jednim prolazom.

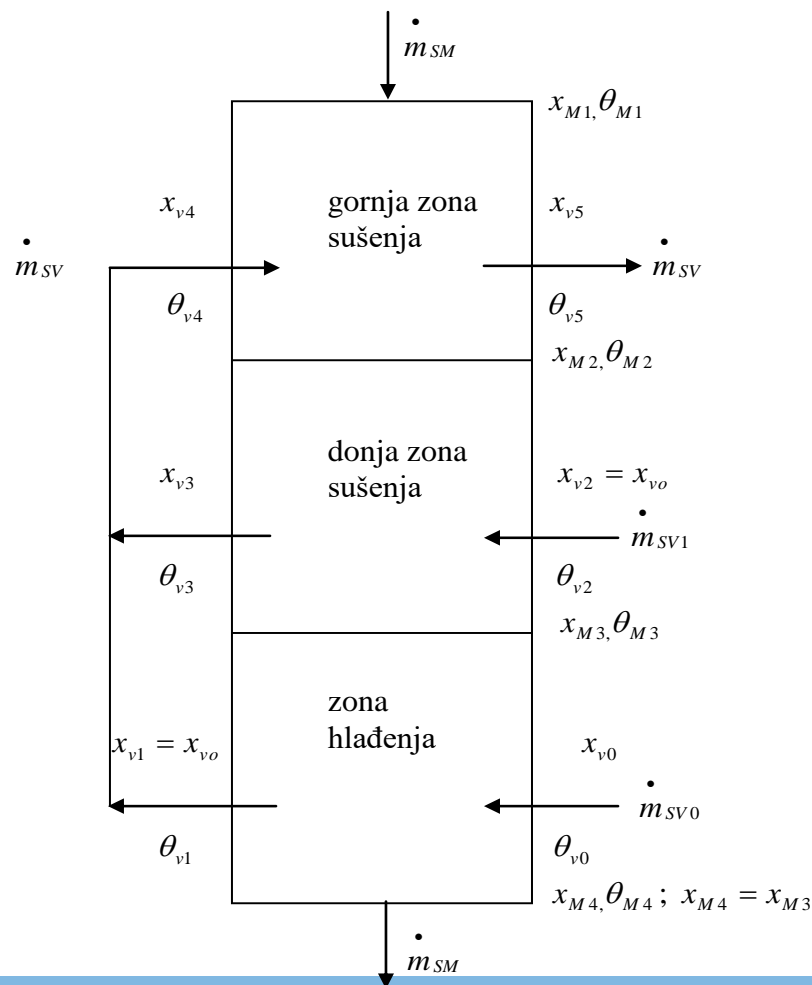


## Termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare za zrnasti material tipa DVSZ-9

- U radu je izvršen kontrolni termički proračun vertikalne dvoprolazne sušare tipa DVSZ-9 za sušenje žitarica u preduzeću “Žitar”, Sečanj, koji će biti ovde i prikazan. Takođe, dat je i pregled svih ulaznih veličina za proračun na osnovu podataka iz Tehničko-tehnološke dokumentacije preduzeća „Žitar“, Sečanj. Izračunate su i sve preostale nepoznate veličine, potrebne za predmetni proračun.
- Na Slici 1. prikazan je pregled svih relevantnih veličina za termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare tipa DVZY-9.



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



Slika 1.

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



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

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

*Tabela 1.*

*Korišćene ulazne promenljive za termički proračun vertikalne sušare tipa DVSZ-9*



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

### - 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:

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

$$\dot{Q}_1 = 200801,7 \text{ W}$$



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

### **- Gornja zona sušenja-**

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

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

$$\theta_{M2} = 36,05 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$





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

### - Mešanje dve struje vazduha-

Materijalni bilans procesa mešanja dve struje vazduha (dogrevanje vazduha za sušenje, rekuperacijom 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-  $\theta_{v3}$  (jednačina (10)), na sledeći način:

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

$$\theta_{v3} = 62,23 \text{ }^\circ\text{C} \approx 62 \text{ }^\circ\text{C}$$



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

### - Donja zona sušenja-

Iz jednačine materijalnog bilansa donje zone sušenja prikazane jednačinom (11) izračunava se aposultna 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:

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

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

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

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

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



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

### - 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-  $\theta_{M4}$  (jednačina 22) na sledeći način:

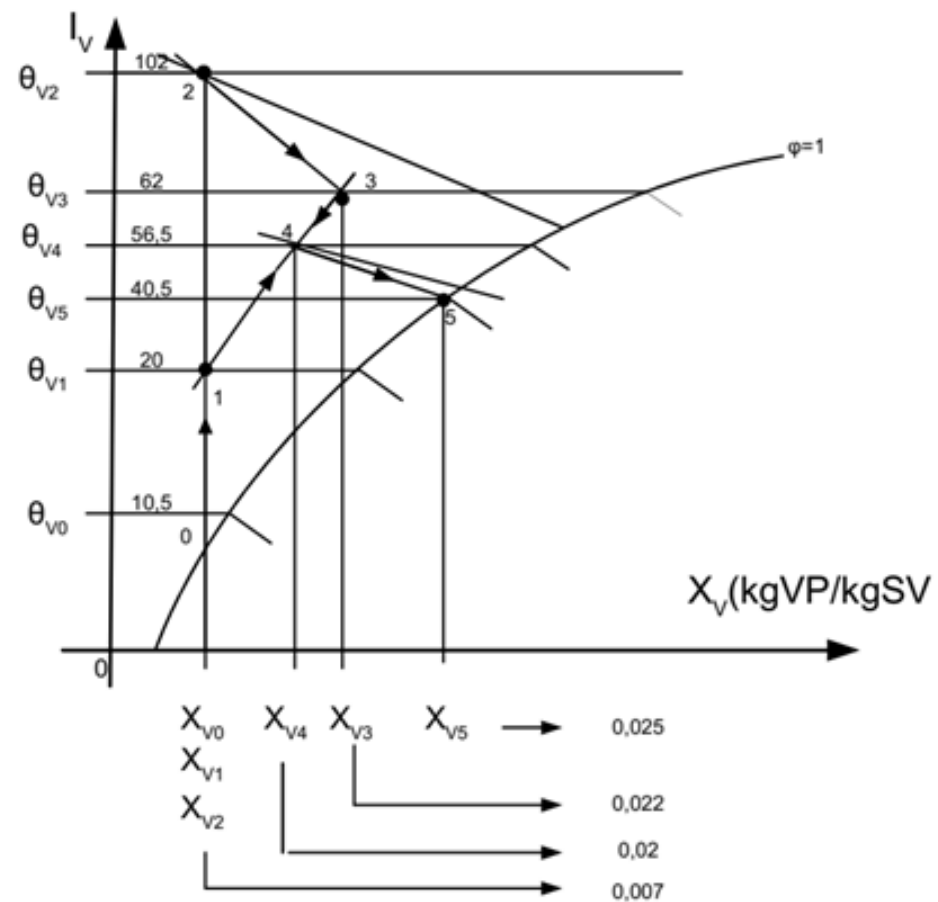
$$\dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M3} - \dot{Q}_3 = \dot{m}_{SM} \cdot (c_{SM} + x_{M3} \cdot c_{wl}) \cdot \theta_{M4} \quad (21)$$

$$\theta_{M4} = 34 \text{ °C}$$

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



## Termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare za zrnasti material tipa DVSZ-9 – prikaz u „i-x“ dijagramu za vlažan vazduh



*Slika 2. Prikaz procesa sušenja po zonama u „i-x“ dijagramu za vlažan vazduh*



## Termički proračun dvoprolazne vertikalne sušare za zrnasti material tipa DVSZ-9 – prikaz u „i-x“ dijagramu za vlažan vazduh

Sa Slike 2. 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.



## 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.



HVALA NA PAŽNJI !

