

**ENERGETSKA ANALIZA KONVEKCIONALNOG I KONDENZACIONOG
SUŠENJA BIOMATERIJALA
ENERGY ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND CONDENSATION
DEHYDRATION OF BIOMATERIALS**

Marina Karić, Borislav Đurović¹
¹Visoka tehnička mašinska škola Trstenik
karićmarina@gmail.com

SAŽETAK

Kako se normalna proizvodnja sušenog voća ne može zamisliti bez redovnog snabdevanja sirovinama, isto tako se ne može zamisliti ni bez redovnog snabdevanja energijom. Sušenje kao tehnološka operacija je veliki „potrošač energije“. Jedan od glavnih ciljeva unapređenja tehnologije sušenja je, pored povišenja kvaliteta osušenog materijala, povećanje energetske efikasnosti. U radu su učinjeni pomaci na planu smanjenja potrošnje potrebne toplotne energije, odnosno goriva, ugradnjom toplotne pumpe. Proračunom toplotnog bilansa urađena je uporedna analiza utroška energije sa i bez toplotne pumpe. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je sušara sa toplotnom pumpom energetski štedljiva, jer je uočeno značajno smanjenje potrošnje toplotne energije što je rezultiralo značajnom uštedom utroška energije za isti proizvodni kapacitet. Ova metoda uštede energije, ujedno je povoljna i s ekološkog aspekta.

Ključne reči: kondenzaciono sušenje, toplotna pumpa, energetska efikasnost sušenja

1. UVOD

Uticao sadržaja vode u hrani na njenu kvarljivost poznata je još od davnina. Između 15000. i 10000. godine p. n. e. naši preci počeli su čuvati višak ribe, mesa i voća sušenjem na vetru i suncu (*Ray, 1992*). Oko 8000. godine p.n.e. predstavljene su mnoge inovacije u metodama očuvanja hrane. Da bi se obezbedila stalna zaliha hrane, žitarice i voće bili su stabilizovani prirodnim sušenjem a višak mesa i ribe su se štitili dimljenjem i suvim soljenjem. Masson i Challet su 1795. godine primenili veštačko sušenje povrća u zatvorenoj prostoriji. U 20-om veku inovacije su obuhvatile veštačko sušenje tečnosti primenom metoda sušenja na valjcima i raspršivanjem kao i sušenje zamrzavanjem.

Sveže ubrano povrće ne može dugo da se očuva (nekoliko dana). Da bi smo imali povrća preko cele godine potrebno ga je doraditi ili preraditi različitim tehnološkim postupcima: konzerviranjem, zamrzavanjem ili sušenjem. Konzerviranje zahteva skupu i kabastu ambalažu, a zamrzavanje skupu opremu (tunele za zamrzavanje). Najveći nedostatak ovih postupaka je u tome koliko se povrća uzme iz ambalaže ili objekta za čuvanje, toliko mora odmah da se potroši. Nasuprot ovome, postupak sušenja povrća ima najširu primenu u praksi. Ono može da se prevozi na velika rastojanja bez posebnih zahteva, da se koristi preko cele godine, može da se pakuje u jeftinu ambalažu, zauzima manji prostor za

skladištenje, čuvanje i transport, ne gubi hranljivu vrednost za duže vreme, ono kvašenjem brzo prelazi u sveže stanje. Na žalost, sušeno povrće se kod nas uvozi. Za dobijanje kvalitetnog osušenog povrća potrebno je odabrati adekvatnu sortu, unutar određene vrste povrća. (Brkić M, Janjić T, 2006.)

Obzirom na prisutnost sušenja u gotovo svim industrijskim granama, i upotrebu uglavnom konvekcijskih sušara očito je da je sušenje nepovoljno s energetskog ali i ekološkog aspekta. Za zagrevanje vazduha troše se velike količine toplote, a vlažni i topao vazduh ispušta se u atmosferu (Sander, 2011). Zbog toga se danas u velikoj meri sušenje provodi tako da se iskoristi toplota koju vazduh na izlasku iz sušare nosi sa sobom.

U ovom radu izložen je jedan od mogućih načina uštede energije upotrebom toplotne pumpe. Toplotna pumpa je rashladni uređaj koji koristi otpadnu toplotu za isparavanje radnog fluida toplotne pumpe pri nižoj temperaturi i istu odaje, nakon kompresije, na višoj temperaturi (tokom kondenzacije) za zagrevanje vazduha koji se vraća u komoru za sušenje.

Cilj rada je da se ukaže na prednosti kondezaconog sušenja u odnosu na klasično konvekcijsko sušenje. Zaključci su izvedeni na osnovu termičkog proračuna kondenzacionog i konvektivnog sušenja. Upotrebom toplotne pumpe postiže se postiče: se velika ušteda energije, zaštita životne sredine i sušenje pri nižim temperaturama, koje se kreću od 40°C do maksimalno 60°C što povoljno utiče na kvalitet sušenog proizvoda.

2. MATERIJAL I METOD RADA

Opis kondenzacione sušare

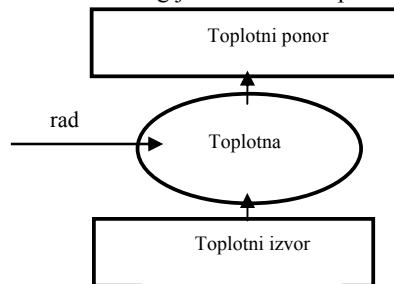
U sušari je zastupljen sistem kondenzaciono konvektivnog sušenja. Kod svih postupaka konvekcijskog sušenja sušenje se provodi u struji zagrejanog vazduha. Toplota se prenosi konvekcijom iz vazduha na površinu materijala i onda dalje kondukcijom unutar materijala. Kružni tok vazduha (potpuna recirkulacija) u sušari ostvaruje se pomoću ventilatora, koje pokreću elektro-motori s promenljivim brojem obrtaja.

Strujeći između lesa sa vlažnim materijalom, vazduh preuzima na sebe vlagu koja nastaje usled njenog isparavanja, izazvanog dovođenjem određene količine toplote. Za izdvajanje vode u kondenzacionim sušarima koristi se modifikovana toplotna pumpa (kondenzacijski agregat). Zbog velike količine vode koja izlazi iz materijala, vazduh treba odvlažiti, da bi mu u procesu sušenja opet povratili efikasnost. Sušenje se odvija bez ubacivanja svežeg vazduha, cirkulacijom istog, kojem se u svakom prolazu preko agregata oduzima voda. Iskorišćeni vlažan vazduh iz komore za sušenje odvodi se u kondenzacijski agregat. Toplotna pumpa se sastoji od dva izmenjivača toplote, pri čemu jedan deluje kao isparivač a drugi kao kondenzator. U prvom izmenjivaču toplote-isparivaču vlažan vazduh koji izlazi iz sušare koristi se kao grejni fluid koji zagreva rashladno sredstvo koje cirkuliše kroz toplotnu pumpu. Rashladni fluid toplotne pumpe prilikom zagrevanja isparava, a nastala para ulazi u kompresor gde se komprimuje na veći pritisak i veću temperaturu. Vlažan vazduh se hladi ispod tačke rose, a količina kondenzovane vode zavisi od stepena rashlađivanja. Vazduh je zbog hlađenja nakon prolaska kroz isparivač zasićen ($\varphi = 100\%$), pa zato nije iskoristiv za sušenje. Ulaskom u drugi izmenjivač toplote – kondenzator, R 407c kao topliji predaje toplotu vazduhu i pri tome kondenzira. U prvi izmenjivač toplote R 407c vraća se preko prigušnog ventila, a zagrejani vazduh se ventilatorom vraća u radni

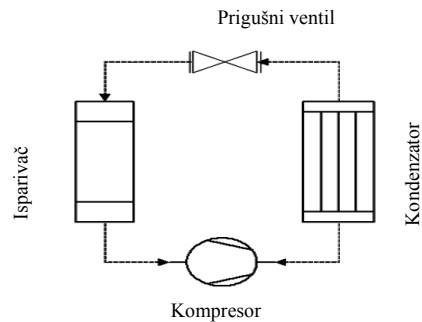
prostor sušare. Pre ponovnog uvođenja u proces sušenja moramo ga zagrejati na temperaturu koju propisuje režim sušenja, dogrevanjem, tj. prolaskom preko dodatnog grejača, postavljenog na ulazu u sušaru, čime mu se snižava relativna vlažnost. Ovakav vazduh je ponovo sposoban da apsorbuje vlagu. Ceo sistem radi pod pritiskom koji u pojedinačnim koracima dostiže 15 bar.

Princip rada toplotne pumpe

Kondenzacijski agregat radi na principu toplotne pumpe. Toplotna pumpa je uređaj koji rade na termodinamičkom principu podizanja toplote, tj. toplotnu energiju uzima od toplotnog izvora niže temperature i predaje je toplotnom ponoru više trošeći pri tom mehanički rad, koji je nekoliko puta manji od prenete energije, pomoću levokretnog kružnog procesa prikladnog radnog fluida. Udeo utrošene električne energije iznosi od jedne trećine do jedne petine dobijene toplotne energije, to znači da se utroškom 1kWh električne energije može izvršiti prenos 3 – 5 kWh toplotne energije.

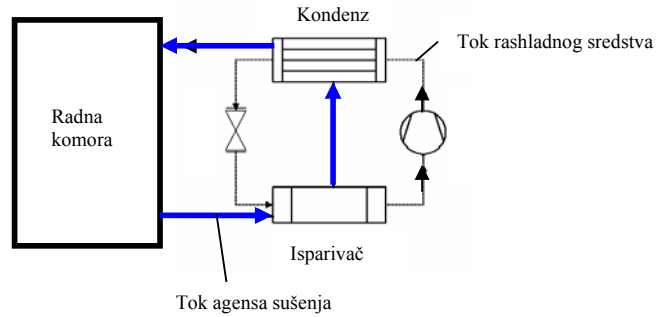


Sl. 1. Šematski prikaz rada plotne pumpe
Fig.1. Operation of the heat pump



Sl. 2. Osnovne komponente parno kompresorske toplotne pumpe
Fig 2. Basic components of steamcompression heat pump

U kondenzacijskom agregatu važnu ulogu ima radna materija (prenosnik energije) koje mora ispunjavati posebne zahteve: pored niske temperature ključanja mora imati što veću specifičnu toplotu i toplotu isparavanja; ne sme biti zapaljivo, toksično i korozivno; mora biti termički i hemijski stabilno i ekološki prihvatljivo. Prvobitno korišćeni hemijski nestabilni halogenizirani ugljovodonici, poznati i kao freoni (R-12, R 22) zamenjuju se stabilnijim (R 134a, R407c, R 410a i R 404a).



Sl 3. Kružni tok vlažnog vazduha i rashladnog sredstva pri kondenzacijskom sušenju
Fig 3. Circular flow of moist air and coolant during condensation dehydration

Radne materije mogu biti i prirodne materije (amonijak, izobutan i ugljen dioksid).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

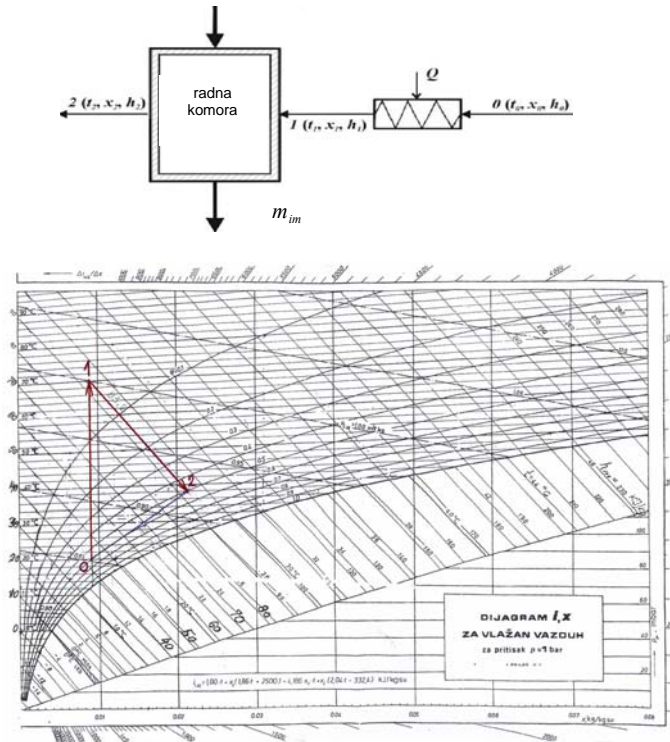
3.1. Rezultati

Termički proračun konvencionalne sušare

Termički proračun sušara obuhvata sastavljanje materijalnog i toplotnog bilansa.

Ulazni podaci:

- količina ulaznog materijala $\dot{m}_{um} = \dot{G} + \dot{W}' = 25 \text{ kg} / \text{h}$
- temperatura ulaznog materijala $t_u = 20^0 \text{ C}$
- vlažnost ulaznog materijala $X_{um} = 80 \%$
- temperatura okolnog vazduha $t_0 = 20^0 \text{ C}$
- relativna vlažnost okolnog vazduha $\varphi_0 = 0,6 (60\%)$
- apsolutna vlažnost okolnog vazduha $x_0 = x_1 = 0,00885 \text{ kg}_W / \text{kg}_L$
- temperatura vazduha na ulazu u sušaru $t_1 = 70^0 \text{ C}$
- temperatura izlaznog materijala $t_i = 38^0 \text{ C}$
- vlažnost izlaznog materijala $x_{im} = 24 \%$
- temperatura izlaznog vazduha $t_2 = 38^0 \text{ C}$
- relativna vlažnost izlaznog vazduha $\varphi = 0,50 (50\%)$
- apsolutna vlažnost izlaznog vazduha $x_2 = 0,0213 \text{ kg}_W / \text{kg}_L$



Sl 4. Šematski prikaz jednoproznog konvekcionalnog sušenja i termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha u h-x dijagramu

Fig 4. One-way convention dehydration and thermodynamic changes of moist air state presented in h-x diagram

Tablični podaci

- specifični toplotni kapacitet vazduha	$c_{pv} = 1,01 \text{ kJ / kgK}$
- specifični toplotni kapacitet suve materije	$c_{sm} = 0,84 \text{ kJ / kgK}$
- entalpija vodene pare pri temperaturi okolnog vazduha (20°C)	$h_{vp1}^* = 2538,2 \text{ kJ / kg}$
- entalpija vodene pare pri temperaturi izlaznog vazduha (38°C)	$h_{vp2}^* = 2570,8 \text{ kJ / kg}$
- entalpija vode pri temperaturi ulaznog materijala (20°C)	$h_{v1}' = 83,86 \text{ kJ / kg}$
- entalpija vode pri temperaturi izlaznog materijala (38°C)	$h_{v2}' = 159,09 \text{ kJ / kg}$
- entalpija okolnog vazduha ($t = 20^{\circ}\text{C}$; $\varphi_0 = 0,6$ (60%))	$h_{v0} = 42,7 \text{ kJ / kg}$
- entalpija vazduha pri temperaturi na izlazu iz sušare (38°C)	$h_{v2} = h_{v1} = 93,2 \text{ kJ / kg}$

Materijalni bilans:

Svu količinu vode koju materijal gubi (ΔW) tokom sušenja upija vazduh koji će ovlažiti od x_1 do x_2 tj. $\Delta W = L(x_2 - x_1)$

- Količina suve materije $\dot{G} = \dot{m}_{um} \cdot [(100 - X_{um})/100] = 5 \text{ kg/h}$
- Količina izlaznog materijala $\dot{m}_{im} = \dot{G} + \dot{W}'' = \dot{G} \cdot [100/(100 - X_{im})] = 6,58 \text{ kg/h}$
- Količina izdvojene vode u sušari $\Delta \dot{W} = \dot{m}_{um} - \dot{m}_{im} = 18,42 \text{ kg/h}$

Radi pojednostavljenja problema:

- vazduh se posmatra kao suvi vazduh+vodena para
- vlažni materijal kao suva materija+voda

Količina suvog vazduha $\dot{L} = \Delta \dot{W} / (x_2 - x_1) = 1479,52 \text{ kg/h}$

Toplotni bilans:

Uneta energija (toplota) u proces sušenja: $\dot{Q}_u = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4$

\dot{Q}_1 - toplota sadržana u vodenoj pari u ulaznom vazduhu pri temperaturi 20°C

$$\dot{Q}_1 = \dot{L} \cdot x_1 \cdot h_{vp1}'' \quad \dot{Q}_1 = 33234,56 \text{ kJ/h}$$

\dot{Q}_2 - toplota sadržana u suvom vazduhu na ulazu

$$\dot{Q}_2 = \dot{L} \cdot c_{pv} \cdot t_1 \quad \dot{Q}_2 = 29886,3 \text{ kJ/h}$$

\dot{Q}_3 - toplota sadržana u vodi u vlažnom materijalu pri temperaturi 20°C

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_{um} \cdot (X_{um}/100) \cdot h_{v1}' \quad \dot{Q}_3 = 1677,2 \text{ kJ/h}$$

\dot{Q}_4 - toplota sadržana u suvoj materiji na ulazu u sušari

$$\dot{Q}_4 = \dot{G} \cdot c_{sm} \cdot t_{um} \quad \dot{Q}_4 = 84 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{Q}_u = 64882,06 \text{ kJ/h}$$

Energija na izlazu iznosi:

$$Q_i = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$$

- \dot{Q}_5 - toplota sadržana u vodenoj pari u izlaznom vazduhu pri temperaturi 38°C

$$\dot{Q}_5 = \dot{L} \cdot x_2 \cdot h_{vp}'' \quad \dot{Q}_5 = 81015,62 \text{ kJ/h}$$

- \dot{Q}_6 - toplota sadržana u suvom vazduhu na izlazu iz sušare

$$\dot{Q}_6 = \dot{L} \cdot c_{pv} \cdot t_2 \quad \dot{Q}_6 = 56783,98 \text{ kJ/h}$$

- \dot{Q}_7 - toplota koju sadrži vlaga u materijalu na izlazu iz sušare pri $t_i = 38^\circ\text{C}$

$$\dot{Q}_7 = \dot{m}_{im} \cdot (X_{im}/100) \cdot h_{v2}' \quad \dot{Q}_7 = 251,23 \text{ kJ/h}$$

- \dot{Q}_8 - toplota sadržana u suvoj materiji na izlazu iz sušare

$$\dot{Q}_8 = \dot{G} \cdot c_{sm} \cdot t_i$$

$$\dot{Q}_8 = 159,6 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{Q}_i = 138210,43 \text{ kJ/h}$$

Dovedena toplota dobija se iz jednačine toplotnog bilansa:

$$\dot{Q}_u + \dot{Q} = \dot{Q}_i \quad \Rightarrow \quad \dot{Q} = \dot{Q}_i - \dot{Q}_u$$

$$\dot{Q} = 73328,36 \text{ kJ/h}$$

Utrošena električna snaga

$$P = 20754,38 \text{ W} \approx 21 \text{ kW}$$

Termički proračun kondenzacione sušare

- temperatura ulaznog vazduha (ispred **kondenzatora** freona)
- apsolutna vlažnost ulaznog vazduha
- temperatura vazduha na „ulazu“ u sušaru
- temperatura izlaznog vazduha (ispred **isparivača** freona)
- apsolutna vlažnost „izlaznog“ vazduha
- relativna vlažnost vazduha ispred isparivača
- temperatura izlaznog materijala
- vlažnost izlaznog materijala
- entalpija osušenog vazduha
- entalpija zagrejanog vazduha

Ulazni podaci:

$$t_1 = 10^0 \text{ C}$$

$$x_1 = 0,00773 \text{ kg}_W / \text{kg}_L$$

$$t_2 = 50^0 \text{ C}$$

$$t_3 = 30^0 \text{ C}$$

$$x_3 = 0,016 \text{ kg}_W / \text{kg}_L$$

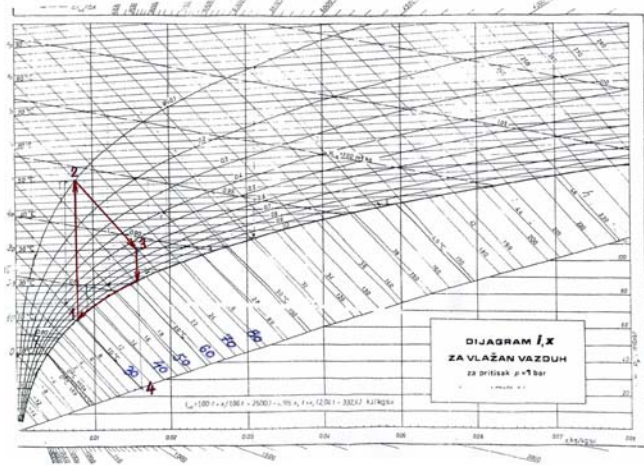
$$\varphi = 0,58 \text{ (58\%)}$$

$$t_i = 50^0 \text{ C}$$

$$x_{im} = 24 \%$$

$$h_1 = 29,6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h_2 = 70 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 5. Termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha u h-x dijagramu stanja kod kondenzacionog sušenja

Fig. 5. Condensation dehydration and thermodynamic changes of moist air state presented in h-x diagram

- 3-stanje vlažnog vazduha pri ulasku u kondenzacijski agregat
- 3-R hlađenje vlažnog vazduha na isparivaču do tačke rose
- R-4 - podhlađivanje vazduha i kondenzacija vodene pare
- 1-2- zagrevanje vazduha na temperaturu sušenja
- 2-3 - adijabatsko sušenje materijala u komori za sušenje

Količina suvog vazduha $\dot{L} = \Delta \dot{W} / (x_3 - x_1) = 2227,33 \text{ kg} / \text{h}$

Toplota koju odaje kondenzator :

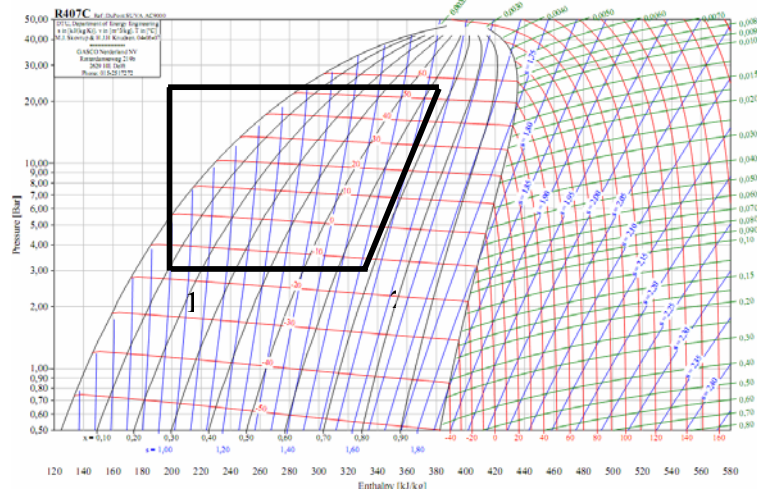
$\dot{Q} = \dot{L}(h_3 - h_1) [kJ]$ $\dot{Q} = 89998,13 \text{ kJ} / \text{h} = 24995,59 \text{ W}$

Iz odnosa predate toplote za grejanje i potrošnje električne energije za pogon kompresora proizilazi koeficijent grejanja koji opisuje efikasnost toplotne pumpe. Koeficijent grejanja toplotnih pumpi koje se primenjuju u tehnici grejanja je dokazan i eksperimentalno.

Iz faznog dijagrama R-407C (smeša od 23% R-32, 25% R-125, 52% R-134a) očitavaju se vrednosti entalpija u karakterističnim tačkama:

$h_1 = h_4 = 300 \text{ kJ} / \text{kg}$; $h_3 = 460 \text{ kJ} / \text{kg}$; $h_2 = 417,5 \text{ kJ} / \text{kg}$

$\text{Koeficijent grejanja} (\varepsilon_g) = \frac{\text{kol. toplote predate u kondenzatoru}}{\text{meh. rad kompresora}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = 3,76$



Sl 5. Fazni dijagram R 407C i ciklus rada toplotne pumpe prikazan na p-h dijagramu
Fig.5. Phase diagram of R 407C and operation cycle of the heat pump presented in p-h diagram

Utrošena električna snaga (snaga kompresora) će biti:

$P = \frac{\dot{Q}}{\varepsilon_g} = \frac{24995,59}{3,76} = 6647,76 \text{ W} \cong 6,65 \text{ kW}$

3.2. Diskusija

Na osnovu dobijenih rezultata može se dobiti odnos toplotnih bilansa konvencionalne i kondezacione sušare:

Kondezaciona sušara : Konvencionalna sušara = 6,65 : 21

Kondezaciona sušara : Konvencionalna sušara = 1 : 3,16

Cirkulacija vazduha kroz kondezacionu sušaru je veća od cirkulacije vazduha kroz konvencionalnu sušaru pa će i snaga ventilatora u kondezacionoj sušari biti veća. Ukupan odnos snaga kondezacione i konvencionalne sušare iznosi:

Kondezaciona sušara : Konvencionalna sušara = 1 : 3

4. ZAKLJUČAK

Najveća prednost kondenzacijskog sušenja je velika energetska efikasnost koju povećava zatvorenost sistema i visok koeficijent grejanja toplotne pumpe. Potrošnja velike količine energije kod konvencionalnih sušara dovodi do povećanja cene proizvoda i umanjenja njegovog kvaliteta. Upotrebom kondenzacione sušare podržane radom toplotne pumpe velika količina energije može biti uštedena, osim toga dobija se kvalitetniji finalni proizvod. Kao energent za pogon kondenzacione sušare koristi se električna energija, tako da ova tehnologija spada u ekološki prihvatljive tehnologije, što znači da nema bitnijeg uticaja na životnu sredinu i okruženje u kome se nalazi.

5. LITERATURA

- [1] Brkić, M., Janić T., Sušenje povrća u tunelskim sušarama biomasom na malom gazdinstvu, "Savremena poljoprivredna tehnika" Jugoslovensko naučno društvo za poljoprivrednu tehniku, Novi Sad, br. 1-2, 2006., st. 71-78.
- [2] Brkić, M., Janić, T., Somer, D.,: Procesna tehnika i energetika, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2006., st. 323.
- [3] Brkić, M.,: Termotehnika u poljoprivredi, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2004., st. 156.
- [4] Zlatković, I., Rudonja, N., Gligorijević, K., Kondenzaciona sušara sa potpunom recirkulacijom vazduha, *Poljoprivredna tehnika* (2010) 3: st. 77-84.
- [5] Voronjec, D., Kozić, Đ., Vlažan vazduh, termodinamičke osobine i primena, Mašinski fakultet, Beograd 1980.
- [6] Velić, D., Projektovanje uređaja u prehrambenoj industriji - Sušenje, Prehrambeno-Tehnološki fakultet, Osijek 2008.
- [7] Bogner, M., Vasiljević, V.,: Osnovi teorije i tehnike sušenja, *Procesna tehnika*(2,3) broj 1,2,3/1986. i 4,5/1987
- [8] Bogner, M., Termotehničar, tom 1 i tom 2, "Interklima- Grafika", Vrnjačka banja, "SMEITS", Beograd, 2004., st. 1752
- [9] Topić M. R., Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara, Naučna knjiga, Beograd, 1989., st. 193.
- [10] Likov A.V., Teorija suški, "Energija", Moskva, 1968.
- [11] Karić, Marina, Ekonimičnost geotermalne toplotne pumpe u sistemu podnog grejanja, *Savremena poljoprivredna tehnika*, 37(2010)4, st. 447-455.

ENERGY ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND CONDENSATION DEHYDRATION OF BIOMATERIALS

Marina Karić, Borislav Đurović

SUMMARY

Ordinary production of dehydrated fruit cannot be realized without regular supply of raw materials and also it cannot be realized without regular energy supply. Dehydration process as a technological operation is a big energy consumer. Apart from increasing the quality of dehydrated materials, one of the main aims of improving dehydrating technology is increasing the energy efficiency. The paper makes a progress in decreasing the consumption of heat energy, i.e. fuel, by installing the heat pump. The heat balance is calculated and the comparative analysis of energy consumption with and without the pump is presented. The results obtained show that dehydration plant having the heat pump saves more energy because considerable decrease of energy consumption is observed, which resulted in significant saving of fuel for the same production capacity. This method of energy saving is also environment-friendly.

Keywords: condensation dehydration, heat pump, energy efficiency of dehydration process

Primljeno: 21. 09. 2011.

Prihvaćeno: 23. 11. 2011.