

UDK: 631.536

*Originalni naučni rad
Original scientific paper*

PRIMENA TOPLOTNIH PUMPI U SISTEMIMA ZA SUŠENJE PREHRAMBENIH PROIZVODA

Ivan Zlatanović^{1*}, Nedžad Rudonja², Kosta Gligorević¹

¹Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Institut za poljoprivrednu tehniku
Beograd - Zemun

²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Sažetak: Upotreba toplotnih pumpi obećava ekonomski i ekološki benefit i veliki broj istraživanja se bavi njihovom primenom u sistemima sušenja prehrambenih proizvoda. Međutim, do njihove masovnije upotrebe u Republici Srbiji na farmama i u industriji još uvek nije došlo uprkos uloznim naporima i promovisanju. U ovom radu analizirane su performanse rada tipičnih konfiguracija sistema sušenja sa stanovišta postizanja maksimalnog koeficijenta grejanja pod određenim spoljnim uticajima i u zavisnosti od željenog režima sušenja.

Ključne reči: toplotna pumpa, koeficijent grejanja, energetska efikasnost, sušenje

UVOD

Toplotna pumpa je uređaj koji uzima toplotu od toplotnog izvora niže temperature i predaje je toplotnom ponoru više temperature uz utrošak rada koji se može dovesti mehanički kompresionom mašinom ili u vidu toplote absorpcionom mašinom. Ideju o korišćenju toplotne pumpe, kao posrednika u ostvarivanju određenog stepena rekuperacije energije dao je još Lord W.T.Kelvin (1852).

Primena toplotne pumpe u poljoprivredi počela je sa korišćenjem raznih uređaja za grejanje. Poslednja istraživanja u svetu i razvoj savremenih tehnologija rezultirali su i njenom primenom u oblasti sušenja. Različite strategije, kao što su na primer upotreba ventila za regulaciju pritiska, višestruki razmenjivači toplote, kontrola protoka, kompresori sa promenljivom brzinom, itd, razvijane su kako bi se usavršili HPD (*Heat Pump Dehumidifier*) sistemi.

* Kontakt autor: Ivan Zlatanović, Nemanjina 6, 11080 Beograd-Zemun.
E-mail: ivan@agrif.bg.ac.rs

Masovnjia komercijalna primena HPD sistema zapažena je u nekoliko zemalja Evrope (Norveška, Francuska i Holandija), Aziji i Australiji i to pretežno u sektoru proizvodnje hrane dobijene iz reka i mora. Izveštaji i dosadašnja iskustva ukazuju na to da su, u poređenju sa konvencionalnim sistemima, HPD sistemi znatno manji potrošači energije.

Energetski efikasne tehnologije sušenja su svakodnevno aktuelna tema, što potvrđuje i obimna literatura koja je usko povezana sa sušenjem, projektovanjem i izgradnjom sušara, psihrometrijom i energetskim aspektima sušenja. Chua [1] i Chou [2] ispituju mogućnosti upotreba HPD tehnologije kod sušenja poljoprivrednih proizvoda (pečurke, voće) i plodova mora (školjke, itd.), Prasertsan [3,4] kod sušenja banane; Mason [5] kod sušenja Macadamia lešnika; Meyer [6] kod sušenja grožđa; Rossi [7] kod sušenja luka; Strommen [8] kod sušenja ribe i plodova mora; i ostali. Furutera [9] i Labidi [10] ispituju mogućnosti korišćenja absorpcionih umesto najčešće korišćenih kompresionih rashladnih mašina. U Norveškoj, Alves-Filho i Strommen [11,12] sprovode istraživanja o niskim temperaturama sušenja uz korišćenje toplotne pumpe za sušenje, osušeni su biomaterjali na niskoj temperaturi od -25°C. Perera i Rahman [13] i Hesse [14] pružaju opšti pregled korišćenja toplotnih pumpi za otklanjanje vlage sušenjem. Mason [15] i Britnell [16] predstavljaju australijski pogled na ovu oblast. Lai i Foster [17] i Flikke [18] proučavaju prilagodljivost toplotnih pumpi za sušenje zrna, zaključujući da je koncept mehanički izvodljiv ali nije ekonomski atraktivan zbog niskih cena goriva koje su preovladavale u to vreme. Međutim, simultano korišćenje kapaciteta grejanja i hlađenja toplotne pumpe se smatra poželjnim. U domaćoj literaturi, takođe se sreću publikacije autora koji se bave problematikom sušenja. Zlatanović [19] utvrđuje prednosti i mane sušenja sa potpunom recirkulacijom vazduha sa podrškom HPD sistema. Živković [20] ispituje kinetiku sušenja koštičavog voća konvencionalnim metodama.

U ovom radu biće sprovedena analiza nekoliko tipičnih konfiguracija sistema sušenja sa toplotnom pumpom sa vazduhom kao toplotnim izvorom i dato poređenje njihovih performansi.

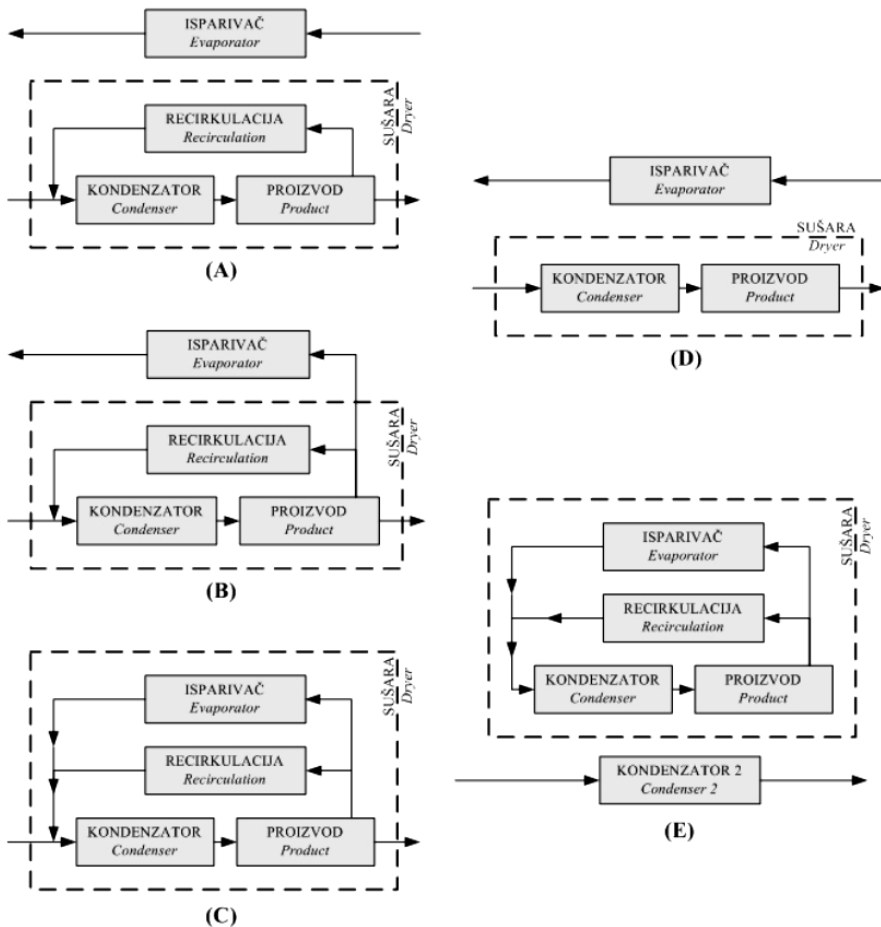
MATERIJAL I METODE RADA

Bannister [21] predstavlja nekoliko različitih konfiguracija sistema sušenja sa toplotnom pumpom koji se razlikuju prvenstveno prema položaju isparivača: toplotna pumpa sa atmosferskim izvorom toplote (Sl.1A), toplotna pumpa sa rekuperacijom otpadne toplote (Sl.1B) i toplotna pumpa sa rekuperacijom otpadne toplote i kontrolom temperature sušenja mešanjem otpadnog i svežeg vazduha (Sl.1C). Prilikom formiranja modela ispitivanja, ovim konfiguracijama će biti pridodate i konfiguracije: toplotna pumpa bez rekuperacije otpadne toplote (Sl.1D) i toplotna pumpa sa rekuperacijom otpadne toplote i potpunom recirkulacijom vazduha (Sl.1E). Tokovi strujanja vazduha prikazani su strelicama. U skladu sa odabranim tipovima (Tab.1) formiran je model za koji će biti sprovedena parametarska analiza prema unificiranom režimu rada (Sl.2). Model sušare je analiziran tako da su temperature toplotnih izvora i ponora uvek veće od 0°C, što je u skladu sa radom ovakvih sistema u realnim uslovima. Režimi sušenja su niskotemperaturni, što znači da u sastavu navedenih konfiguracija komponente toplotne pumpe (kondenzator) predstavlja jedini izvor toplote za zagrevanje vazduha u sistemu, tj. sistem ne poseduje dodatne grejače vazduha (elektro grejači, gasni grejači i slično).

Tabela 1. Režim rada pojedinih tipova sušara

Table 1. Dryer operating parameters

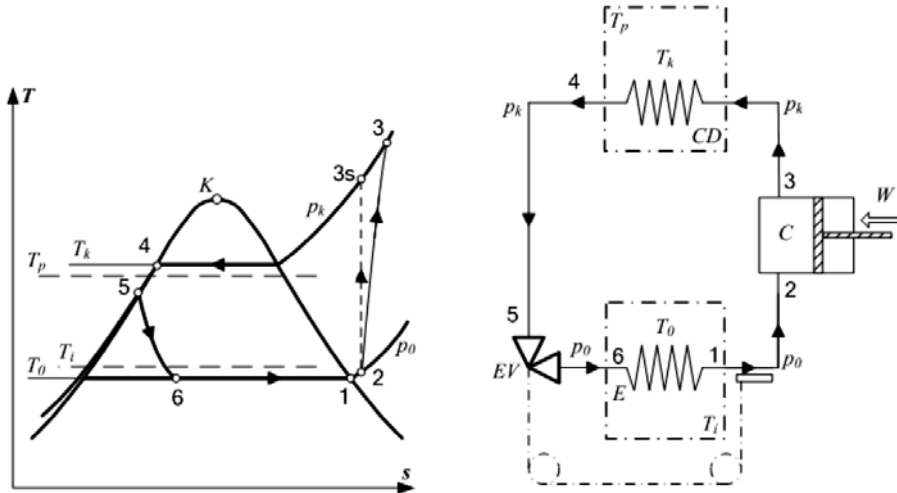
Tip Type	Parametri rada Operational parameters		
	Temperatura toplotnog izvora Heat source temperature	Temperatura toplotnog ponora Heat sink temperature	Temperatura sušenja Drying temperature
(A)	$0 \leq T_i \leq 35^\circ\text{C}$	$20 \leq T_p \leq 50^\circ\text{C}$	$30 \leq T_s \leq 60^\circ\text{C}$
(B)	$20 \leq T_i \leq 50^\circ\text{C}$		
(C)	$20 \leq T_i \leq 50^\circ\text{C}$		
(D)	$0 \leq T_i \leq 35^\circ\text{C}$	$0 \leq T_p \leq 50^\circ\text{C}$	
(E)	$20 \leq T_i \leq 50^\circ\text{C}$		



Slika 1. Konfiguracije sistema sušenja sa toplotnom pumpom

Figure 1. Heat pump drying system configurations

Na osnovu odabranih konfiguracija, formiran je model koji poseduje univerzalan okvir za analizu, tj. formiran je levokretni kružni proces sa freonima R-12, R-22 i R-134a kao rashladnim fluidima.



Slika 2. T-s dijagram i šema rada toplotne pumpe
Figure 2. T-s diagram and heat pump operational scheme

Analiza je sprovedena pod sledećim pretpostavkama:

- $20 \leq T_i \leq 30$ - opseg varijacija temperature toplotnog izvora;
- $20 \leq T_p \leq 50$ - opseg varijacija temperature toplotnog ponora;
- $30 \leq T_s \leq 60$ - opseg varijacija temperature sušenja;
- $T_k = T_s + 15$ - definisanje temperature kondenzacije;
- $T_0 = T_i - 8$ - definisanje temperature isparavanja;
- $T_2 = T_1 + 3$ - pregrevanja pare freona na usisu kompresora iznosi;
- $T_5 = T_s$ - pothlađivanje;
- $\eta = 0,75$ - efikasnost kompresora.

Proces kompresije 2-3 smatran je realnim, tako da je uzeta u obzir i efikasnost kompresora pri određivanju nepovratnosti procesa kompresije. Veličine stanja rashladnih fluida određene su pomoću odgovarajućeg softvera koji poseduje baze podataka za u analizi korišćene freone R-12, R-22 i R-134a.

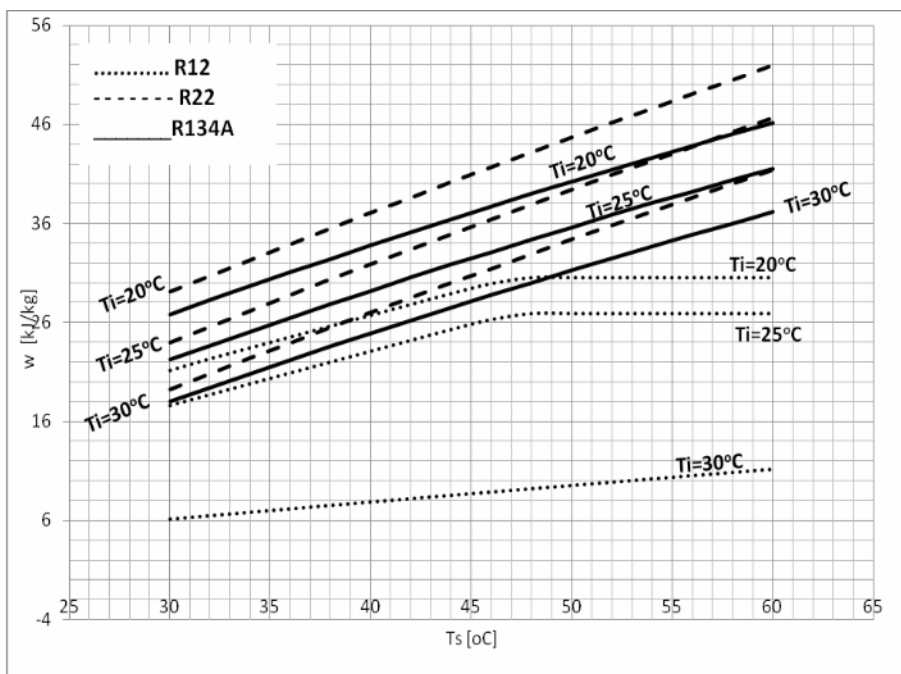
Analiza rada ovako kreiranog modela sprovedena je variranjem temperature sušenja (razmatrani su niskotemperaturski režimi) i temperature toplotnog izvora (koja zavisi od položaja isparivača i njegove uloge u sistemu sušenja). Cilj analize je uspostavljanje odgovarajućih zavisnosti specifičnog rada kompresora i koeficijenta grejanja toplotne pumpe od variranih parametara. Analiza se ponavlja za svaki od navedenih rashladnih fluida u istim uslovima rada toplotne pumpe.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Na osnovu prethodno navedenih uslova a u skladu sa nomenklaturom prikazanoj na šemi (Sl.2), a uz pomoć odgovarajućeg algoritma i softvera [22], kreiran je računarski kod kojim se variraju temperatura sušenja i temperatura toplotnog izvora.

Zbirni dijagram (Sl.3) pokazuje zavisnost specifičnog rada kompresora od temperature sušenja, uzimajući u obzir različite temperature toplotnog izvora (položaj isparivača toplotne pumpe) i vrstu freona. Razmatrana je upotreba tri različita rashladna fluida: R-12, R-22 i R-134A.

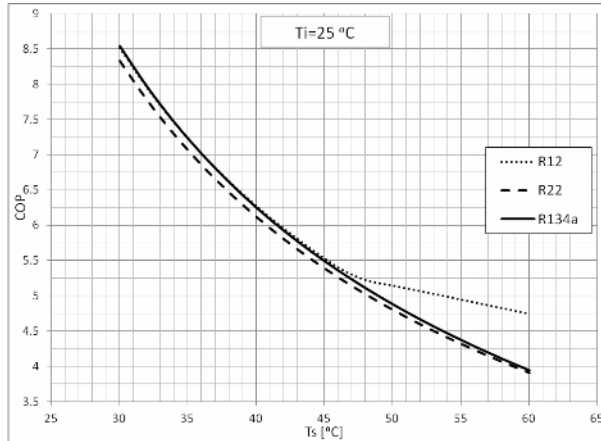
Freon R-12 (CCl_2F_2) je od 1994. zabranjen u zemljama potpisnicima Montrealskog protokola zbog svog štetnog dejstva na ozonski omotač. Zamenio ga je freon R-134A (CH_2FCF_3) koji poseduje slične osobine ali znatno manji destruktivni uticaj na ozonski omotač. Takođe, razmatran je i freon R-22 (CHClF_2) koji je prvobitno bio zamena za R-12, međutim, iako je manje destruktivan od freona R-12, R-22 se polako isključuje iz upotrebe zbog svoje štetnosti po ozonski omotač.



Slika 3. Specifični rad kompresora u određenim režimima rada
 Figure 3. Compressor specific work for several operating conditions

Specifičan rad kompresora raste sa povećanjem temperature sušenja, što je i očekivana pojava jer se tada zahteva viša temperatura na kondenzatoru toplotne pumpe. Primećuje se da kod istog rashladnog fluida, pri istoj temperaturi sušenja, snižavanjem temperature vazduha koji dospeva na isparivač specifični rad kompresora takođe raste.

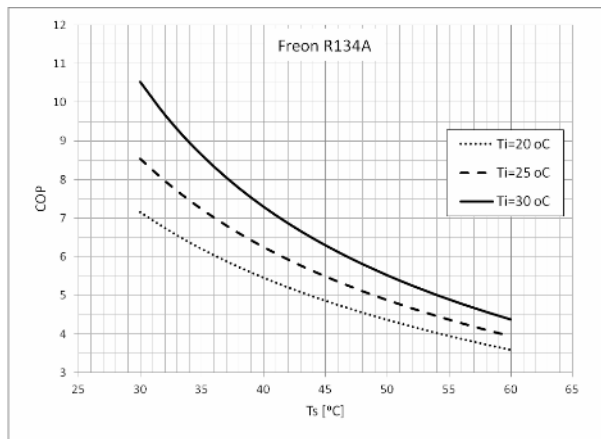
Za iste uslove sušenja i istu temperaturu toplotnog izvora, najmanji specifičan rad kompresora zahteva toplotna pumpa koja radi sa freonom R-12 (poželjan, zabranjen), potom R-134A (dozvoljen) i na kraju R-22 (nepoželjan, zabranjen).



Slika 4. Koeffcijent grejanja pri $T_i = \text{const}$.

Figure 4. COP for $T_i = \text{const}$.

Termodinamički gledano, razlika temperatura isparavanja i kondenzacije najveća je u slučaju visoke temperature sušenja a niske temperature toplotnog izvora, odnosno kada se isparivač toplotne pumpe ne koristi kao rekuperator otpadne toplote već se nalazi u okolnoj sredini (koristi hladan spoljni vazduh). Ovo je slučaj sa konfiguracijama A i D (Sl.1) sušare. Ukoliko se na isparivač (gledano sa vazdušne strane) šalje vazduh više temperature, temperatura isparavanja se podiže, tj. približava temperaturi kondenzacije, tako da je specifičan rad kompresora manji, što bi bio slučaj sa konfiguracijama sušare B, C i E (Sl.1).



Slika 5. Koeffcijent grejanja (R-134A)

Figure 5. COP (R-134A)

Nomenklatura*Oznaka*

<i>T</i>	- temperature
<i>p</i>	- pritisak
<i>C</i>	- kompresor
<i>CD</i>	- kondenzator
<i>EV</i>	- prigušni ventil
<i>E</i>	- isparivač
<i>w</i>	- specif.rad kompresora
<i>W</i>	- rad kompresora
η	- efikasnost kompresora

Indeks

<i>i</i>	- toplotni izvor
<i>p</i>	- toplotni ponor
<i>s</i>	- sušenje
<i>0</i>	- isparavanje
<i>k</i>	- kondenzacija

Ukoliko posmatramo uticaj pojedinih parametara na koeficijent grejanja (COP) toplotne pumpe (Sl.4), primećujemo da se pri istoj temperaturi okoline najveći koeficijent grejanja ostvaruje rashladnim fluidom R-12, potom R-134A, i najmanji sa R-22. Takođe, vidimo da što je niža temperatura sušenja to je COP veći, što je i očekivano jer se temperatura kondenzacije (toplotnog ponora) približava temperaturi isparavanja, pa je za isti uloženi rad toplotnom pumpom moguće “preneti” veću količinu toplote.

Analizirajući promenu koeficijenta grejanja u zavisnosti od temperature sušenja (Sl.5) na istoj toplotnoj pumpi (isti rashladni fluid) vidimo da COP raste ukoliko raste i temperatura toplotnog izvora.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirano nekoliko tipičnih konfiguracija sistema sušenja koje u svom sastavu imaju toplotnu pumpu i dato poređenje njihovih performansi. Koeficijent grejanja toplotne pumpe varira u zavisnosti od režima rada toplotne pumpe kao i od konfiguracije samog sistema u smislu položaja i uloge isparivača toplotne pumpe u sistemu sušenja. Najbolje performanse u smislu minimalnog specifičnog rada kompresora i maksimalnog koeficijenta grejanja ostvaruju se na konfiguracijama koje poseduju rekuperaciju toplote i rade na niskotemperaturnim režimima sušenja. Ukoliko temperature sušenja proizvoda upadaju u gornji opseg temperatura, performanse sistema su nešto lošije ali se na njih može uticati pravilnim izborom rashladnog fluida. Prilikom izbora rashladnog fluida potrebno je voditi računa o željenom režimu rada sušare kao i o konfiguraciji sistema u smislu rasporeda komponenti toplotne pumpe.

LITERATURA

- [1] Chua, K.J., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., 1998. *A two-stage heat pump dryer for better heat recovery and product quality*. J. Institute of Engineers of Singapore 38(6): 8-14.
- [2] Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Chua, K.J., 1998. *On the study of a two-stage heat pump cycle for drying of agricultural products*. Proc. ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology. Phitsanulok, Thailand, Paper H:1-4.
- [3] Prasertsan, S., Saen-saby, P., Prateepchaikul, G., 1997. *Ngamsritrakul P. Heat pump dryer. Part 3: Experiment verification of the simulation*. Intl. J Energy Research 21:1-20.
- [4] Prasertsan, S., Saen-saby, P., 1998. *Heat pump drying of agricultural materials*. Drying Technology 16(1&2):235-250.
- [5] Mason, R.L., Blarcom, A.V., 1993. *Drying macadamia nuts using a heat pump dehumidifier*. Proc. Development and Application of Heat Pump Dryer, Brisbane, Australia, pp 1-7.

- [6] Meyer, J.P., Greyvenstein, G.P., 1992. *The drying of grain with heat pumps in South Africa: A techno-economic analysis*. Intl. J Energy Research 16:13-20.
- [7] Rossi, S.J., Neves, L.C., Kieckbusch, T.G., 1992. *Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to drying of vegetables*. In: Mujumdar AS, ed. Drying '92. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, pp 1475-1484.
- [8] Strommen, I., Kramer, K., 1994. *New applications of heat pumps in drying process*. Drying Technology 12(4): 889-901.
- [9] Furutera, M., Origane, T., Sawada, T., Kunugi, Y., Kashiwagi, T., Takei, T., Aizawa, M., Mori, H., 1996. *Advanced absorption heat pump cycles*. Proc Intl. Absorption Heat Pump Conf. Montreal, pp 109-119.
- [10] Labidi, J., Nikapour, D., De-Parolis, L., 1996. *Hybrid absorption/compression heat pump for space application*. Proc. Intl. Absorption Heat Pump Conf., Montreal, pp 489-496.
- [11] Alves-Filho, O., Strommen, I., 1996a. *Performance and improvements in heat pump dryers*. Drying 96 - Proceedings of the 10th International Drying Symposium, Krakow, Poland, 30 July-2 Aug 1996, vol A., pp405-416.
- [12] Alves-Filho, O., Strommen, I., 1996b. *The application of heat pump in drying of biomaterials*. Drying Tech., 14(9): 2061-2090.
- [13] Perera, C.O., Rahman, M.S., 1997. *Heat pump dehumidifier drying of food*. Trends in Food Sci.Tech., 8:75-79.
- [14] Hesse, B., 1995. *Energy efficient electric drying systems for industry*. Drying Tech., 13:1543-1562.
- [15] Mason, R.L., Britnell, P.M., Young, G.S., Birchall, S., Fitz-Payne, S., Hesse, B.J., 1994. *Development and application of heat pump dryers to the Australian food industry*. Food Australia, 46(7):319-322.
- [16] Britnell, P., Birchall, S., Fitz-Payne, S., Young, G., Mason, R., Wood, A., 1991. *The application of heat pump dryers in the Australian food industry*. In: Drying 94 - Proceedings of the 9 International Drying Symposium, Gold Coast, Australia, Aug 1-4, 1994, pp897-904.
- [17] Lai, F.S., Foster, G.H., 1977. *Improvement in grain-dryer fuel efficiency through heat recovery*. Trans. ASAE, 20(3):579-584.
- [18] Flikke, A.M., Cloud, H.A., Hustrulid, A., 1957. *Grain drying by heat pump*. Agric. Engng., 38(8):592-597.
- [19] Zlatanović, I., Rudonja, N., Gligorević, K., 2010. *Kondenzaciona sušara sa potpunom recirkulacijom vazduha*. Poljoprivredna tehnika, Godina XXXV, Broj 3, Str. 77 – 84, Beograd.
- [20] Živković M., Kosi F., 2005. *Kinetika sušenja koštičavog voća*. Poljoprivredna tehnika, Godina XXX, Broj 3, Str. 71 – 79, Beograd.
- [21] Bannister, P., Carrington, G., Chen.G., 2002. *Heat pump dehumidifier drying technology: Htatus, potential and prospects*. 7th International Energy Agency Conference on Heat Pump technology , Biejing, China, Vol.1, China Architecture and Building Press, pp219-230.
- [22] Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2008. *Interactive Thermodynamics - Fundamentals Engineering Thermodynamics*, Intellipro Inc., 2008.

APPLICATION OF HEAT PUMP DRYING SYSTEMS IN FOOD INDUSTRY

Ivan Zlatanović¹, Nedžad Rudonja², Kosta Gligorević¹

¹University of Belgrade, Faculty of agriculture, Belgrade

²University of Belgrade, Faculty of mechanical engineering, Belgrade

Abstract: Heat pump drying systems application has great potential and provides economical and ecological benefit in food industry. Many researchers deal with a problem of investigating heat pump drying system performance. However, there have not been any massive applications of these systems on farms and in food industry in Republic of Serbia, considering huge effort of their promotion. This paper analyze performances of typical drying systems configurations from the COP and specific compressor work point of view, considering different outside influences and operating conditions.

Key words: heat pump, coefficient of performance, energy efficiency, drying

Datum prijema rukopisa: 24.10.2011.

Datum prijema rukopisa sa ispravkama: 05.11.2011.

Datum prihvatanja rada: 06.11.2011.