

Bibliid: 0350-2953 (2017) 43(2): 45-52

UDK: 631.3; 62;

Originalni naučni rad

Original scientific paper

MOGUĆNOST PRIMENE SOLARNIH SUŠARA ZA SUŠENJE JEZGRASTOG VOĆA

SOLAR DRYERS APPLICATION POSSIBILITIES FOR THE DRYING OF NUTS

Doder Đ., Đaković D.

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija

e-mail: dj.doder@uns.ac.rs

REZIME

U ovom radu napravljen je osnovni pregled solarne tehnike sušenja, sa ciljem naglašavanja mogućnosti primene u procesu sušenja jezgrastog voća. Uzimajući u obzir činjenicu da rešenja ovog tipa uglavnom rade u niskotemperaturskim režimima, primena solarne tehnike može rezultovati zadovoljavajućim kvalitetom osušenih proizvoda, dok se sa druge strane ostvaruje pozitivan uticaj na okolinu, kao i značajna ušteda energije. Posebno je naglašena analiza mogućnosti sušenja oraha kao reprezentativne vrste, zbog toga što je niskotemperaturski režim sušenja u tom slučaju obavezan.

Ključne reči: Obnovljivi izvori energije, solarne sušare, sušenje zrnastih materijala, sušenje oraha

1. UVOD

Poznato je da su sve veći rast energetske potreba čovečanstva, a sve manje rezerve fosilnih goriva i nekontrolisano zagađenje okoline jedan od najvećih problema današnjice. Ova činjenica pred inženjere stavlja obavezu da razvijaju što efikasnija energetska i procesna postrojenja, pri čemu treba da se koriste obnovljivi izvori energije u što većoj meri.

Sušenje, kao jedna od najzastupljenijih procesnih operacija u industriji, veoma je energetska intenzivna. Na primer, u SAD, Kanadi, Velikoj Britaniji i Francuskoj 10-15% ukupne energetske potrošnje u industriji je za procese sušenja, dok npr. u Nemačkoj i Danskoj ovaj udeo raste i do 20-25% [1].

Sušenje zrnastih materijala igra veoma važnu ulogu u industriji hrane, pri čemu se ulažu veliki naponi da se ovaj proces učini što manje zavisnim od fosilnih goriva, dok se istovremeno radi i na poboljšanju kvaliteta proizvoda. Jedna od najzapaženijih strategija ka ostvarenju ovih ciljeva jeste upotreba tzv. solarnog sušenja. Sušenje jezgrastog voća, u smislu matematičkog modelovanja procesa, eksperimentalnog određivanja neophodnih empirijskih parametara procesa, kao i izrade postrojenja za sušenje, može da se analizira na sličan način kao što se to radi kod zrnastih bio-materijala (npr. kukuruza). Tako postrojenja za sušenje jezgrastog voća uglavnom raspoložu sličnim konstrukcionim i procesnim parametrima kao što je slučaj kod sušenja zrnastih materijala [2].

Potrebno je istaći razliku između tzv. "solarnog sušenja" i "sušenja na suncu". Kao što su autori [2] naglasili, solarno sušenje podrazumeva prikupljanje solarne energije (energije toplotnog zračenja) korišćenjem odgovarajuće opreme, da bi se ova energija zatim upotrebila za zagrevanje agensa i dalje sušenje proizvoda. "Sušenje na suncu" je, međutim, uobičajen poljoprivredni postupak koji podrazumeva izlaganje proizvoda direktnom sunčevom zračenju na predviđenoj površini. Tipična solarna sušara ima nekoliko prednosti u odnosu na tradicionalni način sušenja na suncu - sušenje je brže, efikasnije i higijenski ispravnije [2]. Naravno, solarni sistemi zahtevaju izvesne investicione troškove, koji kod konvencionalnog sušenja na suncu praktično ne postoje. Kao reprezentativan primer biće izneta analiza sušenja oraha (*Juglans Regia L.*).

Orasi u spoljašnjoj opni (komini) imaju značajno veći početni sadržaj vlage od onih koji su samo u ljusci (odstranjena opna). Zadovoljavajući krajnji sadržaj vlage je procenjen na 8% po suvoj osnovi. Podaci o ravnotežnom sadržaj vlage takođe su od velikog značaja. Na primer, autori [3] predložili su sledeću relaciju za određivanje ravnotežnog sadržaja vlage:

$$\log \left[\log \left(\frac{1}{1 - rh} \right) \right] = 1,77 \log(M_e) - 2,05 \quad (1)$$

gde je:

rh – relativna vlažnost vazduha za sušenje [-]

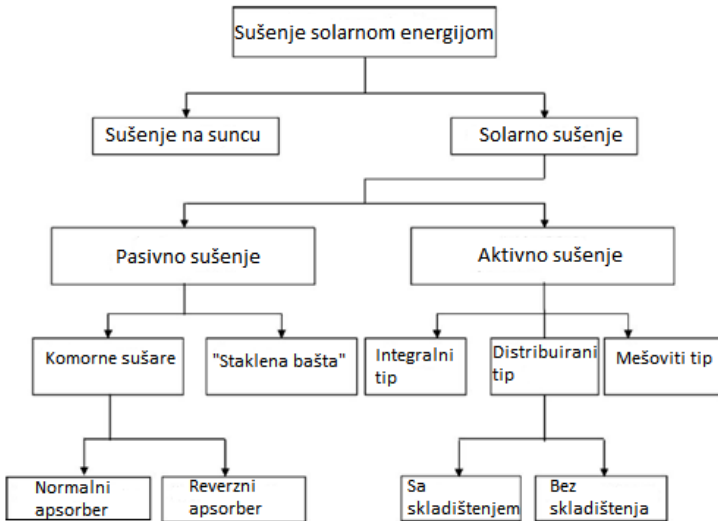
M_e – ravnotežni sadržaj vlage [%]

Dugotrajno izlaganje oraha temperaturama većim od 43°C može da izazove pojavu užeglosti ulja u orasima [3], pa se solarno sušenje i po ovom osnovu nameće kao odgovarajuće rešenje.

2. MATERIJAL I METOD RADA

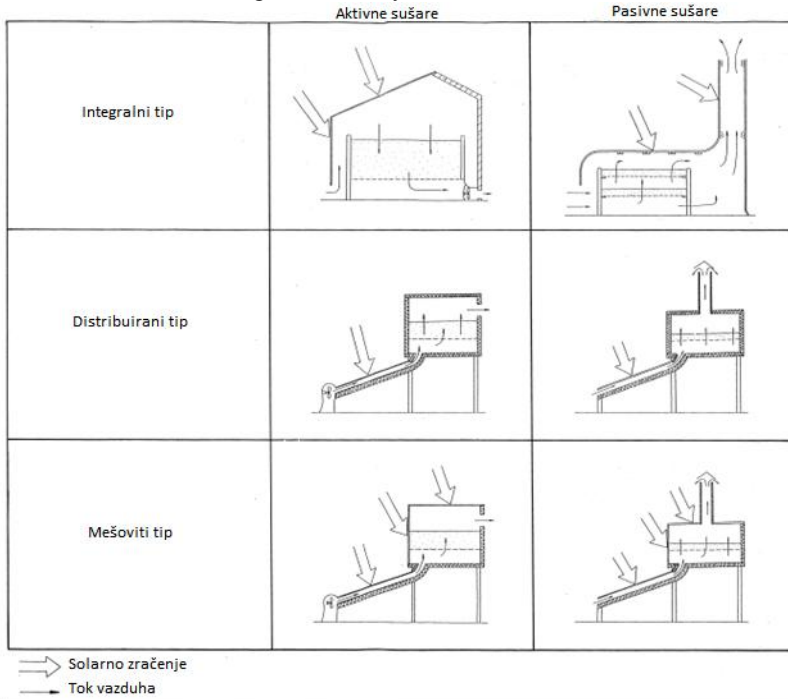
Pregled tehnike solarnog sušenja

Tehnika solarnog sušenja može biti klasifikovana na više načina. Autori predlažu različite pristupe, videti npr. [2]. Ipak, osnovni princip klasifikacije može biti napravljen prema načinu rada: direktno ili indirektno solarno sušenje. Pored toga, veoma je važno identifikovati da li solarna sušara radi u aktivnom ili pasivnom režimu, odnosno da li je konvekcija agensa sušenja (vazduha) forsirana ili je u pitanju prirodna konvekcija [2,4]. Slika 1 [2] ilustruje osnovnu klasifikaciju solarnih sušara, dok su na slici 2 prikazani osnovni tipovi ovih sušara [4].



Sl. 1. Klasifikacija solarnih sušara [2]

Fig. 1. Solar dryer classification



Sl. 2. Osnovni tipovi solarnih sušara [4]

Fig. 2. Solar dryer basic types

Model procesa sušenja

Najšire korišćeni model procesa sušenja jezgrastog voća je onaj koji je predložen od strane autora [3]. Ovaj model u stvari predstavlja adaptirani model sušenja zrnastih materijala. Kada su poznati parametri kinetike sušenja, može se pristupiti i modelovanju sušenja u sloju, gde se uključuju i bilansi mase i energije (vazduha i vlage). Ovakav model se zbog svoje kompleksnosti rešava numeričkim metodama. Za analizu su raspoložive sledeće jednačine.

Jednačina kinetike sušenja:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad (2)$$

Bilans energije za materijal:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h_{cv} \cdot (T_a - T_g)}{\rho_d (c_{pg} + c_{pl}M)} + \frac{\rho_d \cdot (L_g + (c_{pw} - c_{pl}) \cdot T_g) \cdot \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)}{\rho_d (c_{pg} + c_{pl}M)} \quad (3)$$

Bilans energije za vazduh:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\left(-h_{cv} + c_{pw} \cdot \rho_d \cdot \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)\right) \cdot (T_a - T_g)}{G_a (c_{pa} + c_{pw}X)} \quad (4)$$

Bilans mase za vaduh i vlagu:

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{-\rho_d}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (5)$$

gde je:

M – trenutni sadržaj vlage [kg_{vlage}/kg_{suve materije}]

t – vreme [s]

k – empirijski parametar kinetike procesa [1/s]

T_g – temperatura materijala [°C]

T_a – temperatura vazduha [°C]

ρ_d – gustina suvog materijala [kg/m³]

c_{pg} – specifična toplota gasne faze u materijalu [kJ/kgK]

h_{cv} – koeficijent prelaza toplote između gasne i čvrste faze [W/m²K]

L_g – specifični maseni portok vazduha (maseni fluks) [kg/s·m²]

c_{pl} – specifična toplota tečne faze u materijalu [kJ/kgK]

c_{pa} – specifična toplota vazduha [kJ/kgK]

c_{pw} – specifična toplota vode [kJ/kgK]

x – prostorna koordinata [m]

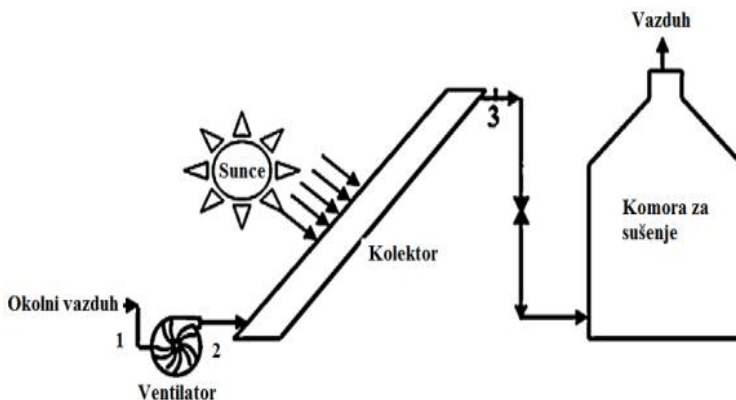
X – apsolutna vlažnost vazduha [kg_{vlage}/kg_{suvog vazduha}]

Dopunske relacije i model za kolektor

Predloženi model je univerzalan i može da se prilagodi za različite slučajeve. Pored pomenutih relacija, važno je dobiti i koeficijente kinetike sušenja. Prema [3], može da se koristi jednačina u sledećem obliku:

$$k = \exp(-0.681 + 0.11M_o 0.952 \ln M_o + 0.000152(1.8T + 32.2)^2) \quad (6)$$

Principijelna šema postrojenja za koje je model postavljen, prikazana je na slici 3 [7]:



Sl. 3. Šema sušare [7]

Fig. 3. Solar dryer scheme

Korisna razmenjena toplota na kolektoru može da se izračuna kao [7]:

$$Q_{kol} = A \cdot F \cdot [\alpha I - h(T_2 - T_{\infty})] = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot (T_3 - T_2) \quad (7)$$

gde je:

Q_{kol} – razmenjena količina toplote na kolektoru [kW]

$\alpha = 0,85$ – pretpostavljeni koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja [-]

I – gustina fluksa solarnog zračenja [W/m^2]

h – koeficijent prelaza toplote sa kolektora na okolni vazduh [W/m^2K]

\dot{m}_a – maseni protok vazduha kroz kolektor [kg/s],

pri čemu se faktor F računa kao:

$$F = \frac{\dot{m}_a \cdot c_{pa}}{A \cdot K} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{A \cdot K \cdot F'}{\dot{m}_a \cdot c_{pa}}\right) \right] \quad (8)$$

gde je:

$F' = 0,984$ – koeficijent [-]

K – koeficijent prolaza toplote na kolektoru [W/m^2K]

Gustina fluksa solarnog zračenja za određeno vreme u toku dana, može biti dobijena kao meteorološka informacija, ili preko relevantnih modela, npr. [8]:

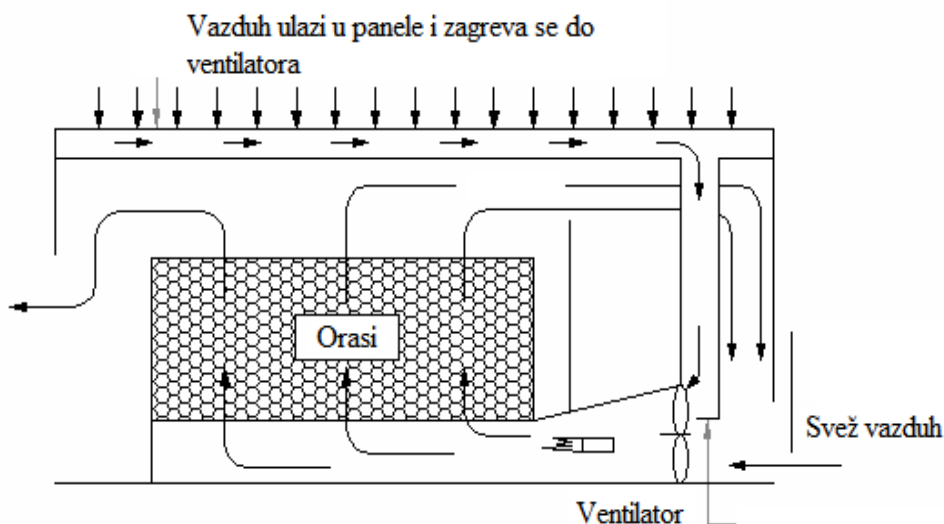
$$I(t_d) = \begin{cases} \frac{J_N}{g_N} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{g_N} (t_d - 0,5) \right] \right\} & ; \quad 0,5 - \frac{1}{2} g_N \leq t_d \leq 0,5 + \frac{1}{2} g_N \\ 0 & ; \quad u \text{ suprotnom} \end{cases} \quad (9)$$

Ovde, J_N predstavlja ukupno zračenje na N -ti dan, g_N trajanje dana ($0 < g_N < 1$), a t_d je frakcioni deo vremena u danu.

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA SA DISKUSIJOM

Faktori odluke

Najuticajniji faktori za donošenje odluke o korišćenju solarnih sušara za sušenje jezgrastog voća su sledeći: godišnja raspoloživost solarne energije, vrsta zasada (što podrazumeva vreme berbe, uticaj na prehrambeni kvalitet, zahteve prezervacije i skladištenja), kao i zahtevana dinamika proizvodnje. Jezgrasto voće koje se suši uglavnom zahteva brzo sušenje [9], jer se neblagovremenim sušenjem značajno gubi na kvalitetu. Zbog vremena berbe (kasno leto), kao i činjenice da ne smeju da se izlažu visokim temperaturama [3], solarne sušare se nameću kao racionalno rešenje. Ali, ako u području zasada nema mnogo sunčanih sati godišnje, možda solarna sušara nije dobar izbor. Solarne sušare su naročito pogodne za ruralna područja, područja u kojima fosilna goriva nisu lako dostupna, za proizvodnju malih razmera u domaćinstvima, kao i za slučajeve gde su mali investicioni troškovi i troškovi rada prioritet. Slika 4 prikazuje princip rada solarne sušare za orahe koja je već u upotrebi. U izveštaju proizvođača se navodi da je energetska ušteda za dva meseca rada, od 1. septembra do 31. oktobra iznosila oko 111300 kWh [10].



Sl. 4. Šematski prikaz rada solarne sušare za sušenje oraha [10]

Fig. 4. Solar dryer for walnuts scheme

5. ZAKLJUČAK

U praksi, izgradnja solarnih sušara za sušenje jezgrastog voća uglavnom se za sada oslanja na inženjersko iskustvo i intuiciju, zbog nedostatka informacija koje nude uvid u radne karakteristike za sušenje željenog materijala, kao i strateških informacija vezanih za meteorološke podatke i jasnu analizu potencijala solarnih sušara za dato područje. Pouzdani i verifikovani modeli, zajedno sa eksperimentalnim podacima, mogu da se

koriste kao polazna tačka za razvoj ovih sistema. Od ključnog značaja je nastojanje da se opiše raspoloživost solarne energije za pojedinačna područja, kao i potencijal primene za pojedinačne materijale. Ovakva saznanja mogu da se iskoriste i za sušenje oraha i drugog jezgrastog voća, što otvara nove mogućnosti u njihovom tretmanu i priliku za uštedu energije.

6. LITERATURA

- [1] Mujumdar, A. S., *Handbook of industrial drying*, 4th edition, CRC Press - Taylor & Francis Group, 2015
- [2] Sharma A., et al., Solar-energy drying systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2009) pp.1185–1210
- [3] Rumsey T., Thompson J., Ambient Air Drying of English Walnuts, *Transactions of ASAE*, (1984), 3, pp. 942-945
- [4] Ekechukwu, O.V., Norton, B., Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications, *Energy Conversion & Management*, (1999), pp. 657-667
- [5] Sun, Y., et al., Mathematical Modelling and Simulation of Near-Ambient Grain Drying, *Computers and Electronics in Agriculture*, 13 (1995), pp. 243-271
- [6] Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Performance of novel solar dryer, *Process Safety and Environmental Protection*, 102 (2016), pp. 183–189
- [7] Wang D., Development of a Visual Method to Test the Range of Applicability of Thin Layer Drying Equations Using MATLAB Tools, *Drying Technology*, 22 (2004), 8, pp. 1921–1948
- [8] Ramos. I. N, et al., Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass transfer model, *Renewable Energy*, 81 (2015), pp. 896-902
- [9] Altuntas E., Erkol M., “Physical Properties of Shelled and Kernel Walnuts as Affected by the Moisture Content”, *Czech Journal of Food Science*, 28 (2010), 6, pp 547–556
- [10] ***, *SolarWall® Carriere & Sons Walnut drying case study*, www.solarwall.com accessed on 10.09.2017

SOLAR DRYERS APPLICATION POSSIBILITIES FOR THE DRYING OF NUTS

Doder Đ., Đaković D.

SUMMARY

In this paper, the review of basic active solar energy techniques used for grain drying applications is presented. Considering the fact that these drying solutions use a low-temperature regime, the implementation of solar drying principle may result in satisfactory quality of dried products, while obtaining a positive impact on the environment and certain energy savings on the other side. Solar dryers are especially suitable for drying of nuts, because of their poor resistance to high temperatures, among the many other reasons. A proposal of the approach of estimating the solar potential for particular cases is given as well.

Keywords: Renewable energy, solar dryers, grains drying, walnuts drying

Primljeno: 05. 05. 2017. god.

Prihvaćeno: 19. 05. 2017. god.