

OBLICI I STRUKTURA ANGAŽOVANE ENERGIJE PRI SUŠENJU BILJNIH MATERIJALA

MODES AND STRUCTURE OF THE ENERGY ENGAGED IN PLANT MATERIAL DRYING

Dr Milovan Živković*, dr Rade Radojević*, dr Mirko Urošević*, dr Franc Kosi*, dr Vaso Komnenić**

* Poljoprivredni fakultet, 11080 Beograd, Nemanjina 6

**PKB INI Agroekonomik, Padinska Skela, Beograd

REZIME

Jedan od procesa uzajamog dejstva vlažog materijala i okoline predstavlja sušenje, čiji je rezultat prenos vlage iz materijala u agens sušenja. Sušenje biljnih materijala, kao što su plodovi voća, kao termički osetljive materijale, predstavlja veoma kompleksan termo-tehički proces. Energetski bilans procesa sušenja kvantitativno definišu: termofizičke osobine materijala i tehnički parametri sistema. Struktura angažovane energije u procesima sušenja je pre svega uslovljena tehničkim parametrima uređaja. U radu je dat pregled rezultata eksperimentalnih ispitivanja utroška energije pri sušenju biljnih materijala nekim od sistema koji po svojoj koncepciji koriste ekološki »čiste« oblike i obnovljive izvore energije. Dobijeni rezultati pokazuju potrošnju pojedinih oblika energije po jedinici količine osušenog materijala.

Ključne reči: Sušara, potrošnja energije, biljni materijal, eksperiment.

SUMMARY

One the mutual effects between wet material and the environment represents the process of drying the result of which is the transfer of moisture from the material to the drying agent. The drying of material such as fruits and medicinal plants known to be thermo susceptible materials, represents a very complex thermo-technical process. The energetic balance of the drying process is quantitatively defined by the thermo-physical properties of the material and the technical parameters of the system. The structure of the energy engaged in the drying process is primarily limited by the technical parameters of the equipment. The objective of the study was to analyse energy consumption in the process of plant material drying using eco systems and renewable energy sources. The results obtained showed the consumption of some energy types per unit of the material dried.

Key words: Plant material, Dryer, Experiment, Energy consumption.

UVOD

Mada je do sada u svetu osvojen veliki broj tehničkih sistema za sušenje voća, različitih kapaciteta, tehničko-tehnološkog nivoa, vođenja i regulacije procesa, postoji i dosta nerešenih problema. To se pre svega odnosi na definisanje osobina materijala, koje neposredno uslovljavaju prenos materije i energije, uslovljen potencijalom i koeficijentom prenosa [1], kao i međusobna zavisnost navedenih pojava u pojedinim fazama procesa. Posledica toga je nepostojanje pouzdane osnove za projektovanje sistema, automatsko vođenje i pogonsku optimizaciju procesa sušenja, što je preduslov za racionalne tehnologije prerađivanja.

Plodovi voća predstavljaju termički vrlo osetljive materijale, koji zahtevaju brzu obradu odmah nakon branja, da bi sačuvali aktivne supstance i organoleptička svojstva. Proces sušenja mora biti indirektan sa regulisanom temperaturom, sastavom i brzinom agensa sušenja. Kvalitet proizvoda neposredno zavisi od uspešnosti dorade i sušenja [3] u vremenskom intervalu od momenta berbe do propisanog načina pakovanja i skladištenja, a direktno je limitiran vremenskim periodom od berbe do sušenja. Realna je pretpostavka da visokoakumulativne proizvodnje kao što je voćarska i proizvodnja lekovitog bilja, će se ostvarivati na manjim i srednjim posedima individualnog sektora, dislocirani dalje od većih preradnih centara. Pored ostvarivanja voćarske proizvodnje i lekovitog bilja, u brdsko-plninskim područjima veoma su značajni prirodni potencijali raznovrsnih biljaka kao što su: šumski plodovi i gljive, čija se primarna prerada ostvaruje sušenjem.

Tendencije u tehnologijama pomenutih proizvodnji određuju osnovne momente značajne za definisanje konceptijskih rešenja sušara, a ta rešenja pre svega treba da su maksimalno mobilna, manjeg (relativno) kapaciteta kao univerzalna.

Sledeći, veoma značajan momenat, opredeljujući za tehnička rešenja sušara je nužno smanjenje utroška energije koja se angažuje. U svetu poslednjih godina se dosta posvećuje pažnja naučnoistraživačkom radu, koji ima za cilj promenu strukture i smanjenje potrošnje energije u procesu sušenja [5], i istovremeno poboljšanje kvaliteta proizvoda. Rezultat toga je nastanak i razvoj tehničko-tehnoloških sistema za sušenje, zasnovanih na korišćenju obnovljivih izvora energije. Osnovna karakteristika tih rešenja je da radni medijum kojim se toplotna energija dobijena sagorevanjem biomase [2], preko razmenjivača prenosi na atmosferski vazduh. Tako zagrejanim vazduhom mogu se sušiti pored voća i materijali kao lekovito bilje, šumski plodovi, gljive i drugo.

MATERIJAL I METOD RADA

Da bi se omogućilo rešenje problema primena uređaja za sušenje različitih biljnih proizvoda počev od lekovitog bilja pa do voćnih plodova, koji se dosta razlikuju po svojim tehnološkim osobinama, potrebno je obratiti posebnu pažnju tehnološkom procesu sušenja materijala, koji zahteva "ekstremne" režime od većeg broja biljnih materijala. Na osnovu termodinamičke analize procesa sušenja pruža se mogućnosti za principijelno određivanje radnih parametara i mogućih ušteda energije. Međutim, za sagledavanje kvantitativnih pokazatelja procesa [6] zahteva se kompleksno modeliranje ili obimna

eksperimentalna ispitivanja u cilju određivanja svih značajnih parametara.

U okviru postsavljenog zadatka istraživanja obuhvaćeno je ispitivanje:

- parametara okolnog vazduha,
- kinetike sušenja i
- potrošnje energije.

Da bi se odgovorilo postavljenom zadatku bilo je potrebno ostvariti konkretna merenja sledećih osnovnih veličina:

- temperature spoljnog vazduha – termoparovima i živinim termometrom,
- relativna vlažnost spoljašnjeg vazduha – vlagomerom na pricipu dilatacije,
- maseni protok tople vode – metodom u povratnom vodu,
- maseni protok vazduha – na osvoju pada pritiska pomoću blende,
- relativna vlažnost agenasa sušenja – vlažni i suvi termometrom,
- temperature materijala u procesu sušenja – akvizicione jedinice i termoparovi,
- promena vlažnosti materijala tokom sušenja – na osnovu merenja mase;
- potrošnja energije – proračunom na osnovu entalpije i količine utrošenog vazduha.

U skladu sa definisanim programom, obuhvaćena su istraživanja procesa sušenja šljiva i kajsija eksperimentalnim putem.

Pošto je osnovna karakteristika procesa sušenja temperaturski režim, eksperimentalna istraživanja sušenja šljiva su koncipirana tako da obuhvate određeni broj merenja sa režimima prikazanim u tabeli 1.

Tabela 1. Temperature agesa i vreme trajanja pojedinih faza

Table 1. Medium temperature and phases duration

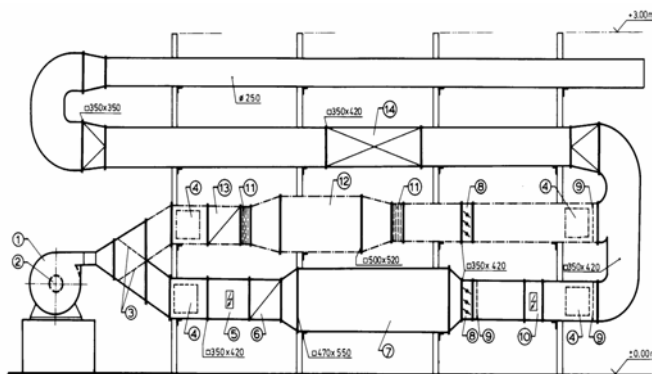
FAZE PHASE	REŽIM SUŠENJA DRYING REGIME					
	I		II		III	
	Trajanje Duration [h]	Tem. agen. Medium temperature [°C]	Trajanje Duration [h]	Tem. agen. Medium temperature [°C]	Trajanje Duration [h]	Tem. Agen. Medium temp. [°C]
Predgrevanje Preheating	1	45	/	/	1	45
Prelazna faza Trans. phase	11	65	/	/	8	65
Pothlađivanje Undercooling	0,5	53	/	/	0,5	54
Intezi. sušenje Inten. drying	7,5	73	20	73	10,5	73
Ukupno traj. Total dur.	20	-	20	-	20	-

Eksperimenti sa plodovima kajsije su obavljani sa stalnim režimom, tako da su tokom procesa sušenja temperatura agenasa i maseni protok agenasa održavani na konstantnom nivou. Na taj način, razlike između pojedinih eksperimenata su određene načinom pripreme plodova za sušenje. Eksperimentalno istraživanje procesa sušenja šljiva, kajsija sprovedena su pomoću laboratorijske univerzalne sušare i u eksploatacionim uslovima na prototipskoj sušari UVS-4 [5].

Šematski prikaz laboratorijske instalacije dat je na slici (Sl. 1) i sastoji se od sledećih celina: elektromotor sa ventilatorom, "topli" kanal za pripremu vazduha, "hladni" kanal, merni kanal sa komorom za smeštaj materijala za sušenje i odvodni kanal. Ventilator je radijalnog tipa sa regulatorom za protok vazduha u obliku leptira smeštenog u centru kućišta. Osim leptirom, po-

dešavanje protoka se može ostvariti i promenom broja obrtaja ventilatora. Ventilator dobija pogon od elektromotora snage 2,2 kW ($\cos \varphi=0,86$). U kanalu za pripremu vazduha su pregrejač, hladnjak, maglena komora, regulator protoka, dogrejač i zasuni. Predgrejač sa električnim pogonom kapaciteta 18 kW sastavljen od četiri grejna tela i to dva sa po 2 kW, jedno od 4 kW i jedno od 10 kW. Dogrejač ukupne snage 13,2 kW, smešten u kanalu dimenzija 350x420 mm sa električnim pogonom. Sastoji se od 5 grejnih tela i to dva sa 1,5 kW, jedno od 2,9 kW, jedno od 3,6 kW i jedno 3,7 kW.

Komora za sušenje predstavlja deo kanala dimenzija 350x350 mm dužine oko 1m. Na početku i na kraju komore postavljeni su nosači za smeštanje lesa. Iznad komore za sušenje smeštena je vaga, tako da se preko ploče sa četiri užeta, povezuje ram sa lesama koji se nalazi u komori. Na ovaj način moguće je kontinualno pratiti promenu mase sušenog materijala na lesama u procesu sušenja.



Sl. 1. Šematski prikaz univerzalne instalacije za pripremu agenasa

Fig. 1. An overview of a universal installation for medium preparation

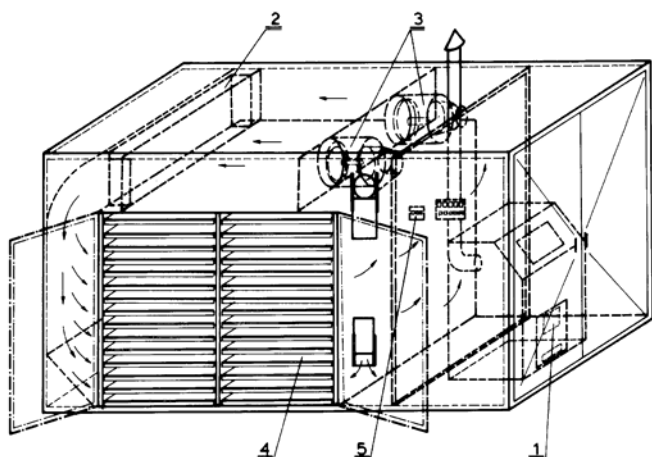
1. Ventilator, 2. Regulator vazduha na ventilatoru, 3. Razvodni kanal, 4. Bočni šiberi, 5. Predgrejač, 6. i 13. Hladnjak, 7. Maglena komora, 8. Regulator protoka vazduha, 9. Poprečni zasuni, 10. Dogrejač, 11. Eliminatori kapi, 12. Komora za hlađenje, 14. Komora za sušenje,
1. Fan, 2. Fan air regulator, 3. Distributor channel, 4. Lateral bar, 5. Preheater, 6 and 13 Cooler, 7. Fog chamber, 8. Air flow regulator, 9. Cross bar, 10. Heater, 11. Drop eliminator, 12 Cooling chamber, 14. Drying chamber

Šematski prikaz univerzalne sušare dat je na slici 2, a sastoji se od sledećih celina: toplovodni kotao, razmenjivač toplote - zagrejač vazduha, aksijalni ventilatori, komora za sušenje i sistem za regulisanje temperature vazduha. Toplovodni kotao snabdeven je odgovarajućom armaturom namenjen za režim rada 90/70°C, pritiska 2,5 bara, snage 36 kW (gorivo – mrki ugalj). Kao goriva mogu se koristiti drvo i otpadni biljni materijali pri čemu je snaga kotla oko 30 kW. Distribucija tople vode do razmenjivača obavlja se pomoću cirkulacione pumpe i razvoda od čeličnih bešavnih cevi.

Zagrejač vazduha je kompaktni pločasti razmenjivač snage 30 kW (za radni režim 90/80°C) izrađen od bakarnih bešavnih cevi na kojima su navučene aluminijumske lamele. Razmenjivač je ispitan na hermetičnost vazduha sa pritiskom od 25 bara. Strujanje vazduha se obezbeđuje pomoću dva aksijalna ventilatora

Komora za sušenje je zapremine 4 m³ gde su postavljene lese u dva reda, po visini na rastojanju od 100 mm, a ukupan broj lesa je 56. Sistem za regulaciju temperature vazduha za sušenje sastoji se od kanalskog senzora temperature, sa NTC-

termistorom, mikroprocesorske upravljačke jedinice, trokrakog regulacionog ventila, elektromotornog prekidača ventilatora i transformatora 220/24 V.



Sl. 2. Šema prototipa univerzalne sušare UVS-4

Fig. 2. Prototype of a universal UVS-4 dryer

1. Toplovodni kotao; 2. Zagrejač vazduha; 3. Ventilatori; 4. Komora za sušenje sa lesama; 5. Sistem za automatsku regulaciju temperature.

1. Warm water kettle, 2. Air heater, 3. Fans, 4. Drying chamber with wattles, 5. Automatic temperature regulation system.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Racionalnost procesa sušenja koštičavog voća se definiše parametrom koji predstavlja potrošnju energije. Glavni cilj u svakoj tehnologiji sušenja je postizanje zadovoljavajućeg kvaliteta proizvoda uz najmanju potrošnju energije. U sprovedenim eksperimentima potrošnja energije pri sušenju određivana je na dva načina i to: računski na osnovu promene entalpije vazduha pri zagrevanju u razmenjivaču toplote (kod prototipske sušare), odnosno na električnim grejačima (na laboratorijskoj instalaciji). Pored toga potrošnja energije je dobije i posredno, merenjem utroška ogrevnog drveta u toplovodnom kotlu (kod prototipske sušare), kao i određivanjem potrošnje električne energije na osnovu registrovanog uključivanja segmenata predgrejača i dogrejača vazduha. Utrošak električne energije kod prototipske sušare ostvaren je na osnovu snage pojedinih uređaja i vremene njihovog rada.

Potrošnja energije pri sušenju šljiva

Potrošnja energije određena na osnovu promene entalpije vlažnog vazduha za eksperimente sa plodovima šljive na laboratorijskoj prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2. Potrošnja energije pri sušenju šljiva na laboratorijskoj sušari

Table 2. Energy consumption during plum drying by laboratory dryer

Ogled test	REŽIM SUŠENJA DRYING REGIME											
	I				II				III			
	Određeno entalpijom vazduha Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption		Određeno entalpijom vazduha Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption		Određeno entalpijom vazduha Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption	
	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]
1	5900	2360	6600	2640	7000	2800	7740	3096	8100	3240	8960	3584
2	5800	2416	6390	2662	6900	2875	7580	3158	8000	3333	8830	3679
3	5950	2380	6500	2600	7200	2880	7870	3148	7900	3160	8750	3500

Rezultati u tabeli 2 pokazuju značajnu razliku u utrošku energije u pojedinim režimima sušenja, dok su razlike između eksperimenata za isti režim neznatne i mogu se objasniti nepostojanjem identičnih uslova za sve eksperimente kao i greškama merenja. Analizirajući eksperimente prvog i drugog režima sušenja (nakon 16 časova sušenja) pokazuju da je utrošak energije približan i u proseku kreće se oko 6000 [kJ/kg w]. Poređenjem eksperimenata drugog i trećeg režima sušenja uočava se da oba procesa imaju isto trajanje (tabela 1), ali je potrošnja energije različita (razlika dostiže vrednosti i do 1200 [kJ/kg w]).

Daljom analizom uočava se da je kod laboratorijske sušare stvarna potrošnja energije (određena utroškom električne energije za zagrevanje vazduha) veća u odnosu na utrošak određen preko entalpije vazduha za oko 10%. To pokazuje da toplotna izolacija laboratorijske sušare, i pored brižljivog montiranja izolacionih obloga, "dozvoljava" toplotne gubitke o kojim se mora voditi računa.

U tabeli 3. prikazana je specifična potrošnja energije određene na osnovu promene entalpije vazduha, za eksperimente sa šljivom na prototipskoj sušari, gde su uslovi približno isti drugom režimu sušenja na laboratorijskoj sušari. Analizom vrednost uočava se razlika u utrošku energije, tako da je kod laboratorijske sušare, u proseku veća za oko 1000 [kJ/kg w]. Razlika specifične potrošnje energije za eksperimente kod različitih sušara pod približno istim uslovima se mogu objasniti činjenicom da je specifična potrošnja vazduha po kilogramu osušenih plodova kod laboratorijske sušare veća.

Tabela 3. Potrošnja energije pri sušenju šljiva na prototipskoj sušari

Table 3. Energy consumption during plum drying by prototype dryer

Ogled Trial	Vrsta energije Energy type					
	Toplotna energija Heat energy				Električna energija Electrical energy	
	Određeno preko entalpije vaz. Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption		Pogon vent. Fan power	Pogon merne i reg. opreme Power of measu. and regul. equip.
	[kJ/kgw]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]
1	5960	2292	9750	3750	331	294
2	5870	2348	9730	3742	329	312
3	5980	2392	9800	3769	330	275

Usvajajući da je donja toplotna moć drveta 12000 [kJ/kg], eksperimentalno određena potrošnje energije za pogon toplovodnog kotla pri sušenju plodova šljive na prototipskoj sušari kretala se i do 10000 [kJ/kg w]. To ukazuje na veoma izražene gubitke pri transformaciji i prenosu energije u uređajima za

pripremu tople vode. Osim toga, na povećanje gubitaka kompletno u sušari uticala je nedovoljna izolacija poda i spojevi vrata komore za sušenje. Obzirom da prototipska

sušara za svoj rad pored toplotne energije dobijene sagorevanjem goriva (drвета) koristi i električnu energiju neophodno je registrovati i tu potrošnju, izraženu wh/kg osušenih plodova.

Analizom tabele 3 uočava se da je utrošak električne energije za pogon ventilatora po eksperimentim je sa neznatnim odstupanjem što je uglavnom posledica greške u merenju. To se objašnjava time što su u svim eksperimentima sa istim vremenom trajanja, ventilatori radili neprekidno i istim intezitetom. Međutim, uočava se razlika u potrošnji električne energije za pogon merno-regulacionih uređaja po ogleđima, što se može objasniti različitim uslovima rada sistema.

Potrošnja energije pri sušenju kajsija

Utrosak energije pri sušenju kajsije se razlikuje od potrošnje pri sušenju šljiva, najpre zbog razlike u ostvarivanju režima eksperimenata, nasipnoj masi, kao i razlikama termofizičkih osobina i oblika sušenog materijala. Angažovana energije pri sušenju kajsije dobijena na osnovu entalpije vazduha i merenje preko utroska goriva kod laboratorijske sušare prikazana je u tabeli 4 a izražena u kJ po kilogramu isparene vlage i kJ po kilogramu osušenih plodova.

Tabela 4. Potrošnja toplotne energije pri sušenju kajsija laboratorijskoj sušari

Table 4. Energy consumption during apricot drying by laboratory dryer

Ogled Trial	Određeno preko entalpije vazduha Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption	
	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kg w]	[kJ/kg]
1.	11400	4750	12600	5250
2.	11200	4666	12350	5145
3.	11730	4887	12800	5333

Veća potrošnja energije određena pri sušenju na laboratorijskoj instalaciji u odnosu na prototipsku sušaru (tab. 5.) može se objasniti većom specifičnom potrošnjom vazduha za sušenje kao i manjim stepenom iskorišćenja zapremine komore za sušenje.

Tabela 5. Potrošnja energije pri sušenju kajsija na prototipskoj sušari

Table 5. Energy consumption during apricot drying by prototype dryer

Ogledi Trial	Vrsta energije Energy type					
	Toplotna energija Heat energy				Električna energija Electical energy	
	Određeno preko entalpije vazduha Define by air enthalpy		Stvarna potrošnja Real consumption		Pogon vent. Fan power	Pogon mer. reg. opreme Power of meas. and regul. equ.
	[kJ/kg w]	[kJ/kg]	[kJ/kgw]	[kJ/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]
1	9700	3730	15900	6115	529	470
2	9560	3676	15850	6096	526	499
3	9740	3746	15970	6142	528	440

Znatna razlika u stvarnoj potrošnji energije pri sušenju na prototipskoj sušari u odnosu na vrednosti dobijena preko entalpije vazduha, može se objasniti istim uzrocima kao pri sušenju šljiva.

Odnos specifične potrošnje energije sušenja kajsija i šljiva, za eksperimente ostvarene pod približno identičnim režimima kreće se oko vrednosti 1,6. Tome doprinose i krajnje vlažnosti kajsije, kao i sam režim sušenja; kod sušenja šljive početna temperatura agensa iznosi najčešće 44°C a krajnja oko 75°C, a kod kajsije temperatura vazduha raste od 45° - 65°C. Vreme sušenje šljive je 18-20, a kajsija 20-25 časova.

ZAKLJUČAK

Prema izvedenim eksperimentima za različite režime sušenja na laboratorijskoj i prototipskoj sušari, kao i stečenih teorijskih i praktičnih saznanja tokom istraživanja, mogu se izvesti zaključci:

- Režim i vreme trajanja procesa sušenja koštičavog voća kao osnovni tehnološki parametri, direktno utiču na utrošenu količinu energije i kvalitet osušenog proizvoda.
- Savremena tehnička rešenja sušara treba da omoguće korišćenje obnovljivih i ekoloških h oblika energije.
- Da bi se omogućilo korišćenje obnovljivih izvora energije gorionici na sušarama treba da budu tehnički prilagođeni za korišćenje čvrstih goriva, biljnih sekundarnih proizvoda.
- Proces razmene toplote treba da se ostvaruje prinudnim strujanjem vazduha.
- Usklađenošću odnosa između temperature agensa sušenja i vremena trajanja procesa može se računati na dobre rezultate, kojima će se istovremeno obezbediti racionalna potrošnja energije i kvalitet osušenih plodova.

LITERATURA

- [1] Antonijević, D., Voronjec, D.: Kretanje vlaga unutar materijala tokom procesa sušenja sa konduktivnim dovodenjem toplote, "Procesna tehnika" br. 2 - 3, st. 318-321, Beograd, 1992.
- [2] Babić, M., Babić Ljiljana, Martinov, M.: Stanje i mogućnosti korišćenja biomase kao goriva u poljoprivredi, Savremena poljoprivredna tehnika 20, 4, 171-178, 1994.
- [3] Marković, V.: Tehnologija sušenja, prerada i pakovanje suvih šljiva, Beograd, 1995.
- [4] Raičević, D., Ercegović, Đ., Kosi, F., Vukić, Đ., Živković, M., Radojević, R., Milenković, R.: »Projekt prototipa univerzalne vučene sušare UVS 4«, inovacioni projekt finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Srbije, (saradnja sa Institutom za proučavanje lekovitog bilja »dr Josif Pančić« - Beograd), Beograd, 1995.
- [5] Živković, M., Radojević, R., Raičević, D., Kosi, F., Ercegović, Đ., Vukić, Đ.: Nove tehnologije niskotemperaturnog sušenja koštičavog voća, X Kongres voćara Jugoslavije, Čačak, 1996
- [6] Živković, M.: Određivanje optimalnih parametara tehničko-tehnoloških sistema za sušenje koštičavog voća, Doktorska disertacija, Beograd, 1999.

Primljeno: 14.03.2005.

Prihvaćeno: 17.03.2005.