



UDK: 66.047.49

*Originalan naučni rad
Original scientific paper*

KINETIKA SUŠENJA KOŠTIČAVOG VOĆA

Milovan Živković, Franc Kosi*Poljoprivredni fakultet - Beograd*

Sadržaj: U radu su prikazani rezultati istraživanja tehničko tehnoloških parametara procesa niskotemperaturskog sušenja plodova koštičavog voća (šljiva i kajsija). Eksperimentalna istraživanja sprovedena na laboratorijskoj instalaciji i na prototipskoj univerzalnoj sušari namenjenoj za sušenje biljnih materijala, obuhvatila su strujnotermička merenja, parametre kinetike procesa i tehnološke parametre sušenja. Posebno su analizirani temperatura i relativna vlažnost agensa sušenja, vlažnost i temperatura materijala za sušenje kao i brzina sušenja.

Rezultati pokazuju da period predgrevanja materijala iznosi od 2-3 h, što je uslovljeno vrstom materijala i režimom sušenja tj. stanjem agensa sušenja. Maksimalna brzina sušenja plodova šljive nastaje nakon 2 h i iznosi oko 1,15 kg w/kg s. m. h. Kod sušenja plodova kajsija maksimalna brzina sušenja iznosi približno 0,45 kgw/kg s.m.h. i pojavljuje se tek nakon 4 časa od početka procesa u čemu se razlikuje od brzine sušenja plodova šljive za približno isti režim sušenja. Pored toga, kriva kinetike sušenja kajsija ima drugačiji oblik u odnosu na krivu sušenja šljiva.

Ostvaren kvalitet obe vrste osušenih plodova sa navedenim niskotemperaturskim režimima u velikoj meri odgovara standardima, pre svega u pogledu gubitka šećera i kiselina, kao i odsustva bilo kakvih mirisa i zagađenosti plodova.

Dobijeni rezultati ukazuju da, pored tehničkih rešenja sistema za sušenje, na uspeh procesa značajan uticaj ima i samo vođenje procesa čije se trajanje može redukovati.

Ključne reči: *niskotemperatursko sušenje, koštičavo voće, strujno termička merenja, kinetika sušenja.*

1. UVOD

Brzom razvoju savremene nauke o sušenju doprinos je dao veliki broj autora u brojnim teorijskim i eksperimentalnim radovima. Međutim, uprkos intenzivnim i obimnim istraživanjima, može se reći da današnje poznavanje procesa u vlažnim materijalima ne zadovoljava potrebe koje diktira razvoj novih tehnologija sušenja. Zbog različitog načina vezivanja vlage sa materijalom i različitih mehanizama transporta, ispitivanja ovih procesa u njihovom najkompleksnijem obliku i provera osnovnih teorijskih zavisnosti još uvek je veoma teška. Problem se posebno ogleda u

nemogućnosti da se dovoljno tačno odrede koeficijenti transporta vlage u stvarnim materijalima čak i za uprošćene modele procesa.

Dosadašnji eksperimentalni rezultati istraživanja sušenja koštičavog voća pokazuju da u uobičajenim granicama njihovih vlažnosti ne postoji period konstantne brzine sušenja. Unutrašnji otpori transportu vlage su značajniji od spoljašnjih, ali to još uvek ne znači da je uticaj konvektivnog prenosa vlage na brzinu sušenja u potpunosti zanemarljiv, bar u početnom periodu procesa.

S obzirom na veoma složene mehanizme veze vlage sa materijalom u kapilarno-poroznim koloidnim telima, određivanje stanja ravnoteže plodova voća sa vazduhom određene temperature i vlažnosti, moguće je jedino eksperimentalnim putem.

2. MATERIJAL I METOD RADA

Eksperimentalna istraživanja sušenja šljive su koncipirana tako da obuhvate određeni broj ponovljenih merenja sa tri režima. Režim I obuhvata tri faze: faza predgrevanja u trajanju od 1 časa sa temperaturom vazduha od 45 °C, prelazna faza u trajanju od 11 časova sa temperaturom od 73 °C (do faze podhlađivanja koja traje od 30 minuta sa temperaturom od 53 °C), faza sušenja sa temperaturom od 73 °C do dostizanja zadate vlažnosti. Režim II sadrži samo jednu fazu sa konstantnom temperaturom od 73°C. Trajanje procesa sušenja u svakom od eksperimenata je definisano dostizanjem odgovarajuće vlažnosti plodova (28,3-29,5%). Režim III obuhvata četiri faze: predgrevanje u trajanju od oko 1 čas sa temperaturom vazduha za sušenje od 45°C, prelazna faza u trajanju od oko 8 časova je sa temperaturom vazduha od 65°C, fazu podhlađivanja u trajanju od 30 minuta (nakon 13 časa od završetka prethodne faze) sa temperaturom vazduha od 54 °C, fazu sušenja sa temperaturom od 73 °C (maksimalna temperatura vazduha) do postizanja krajnje vlažnosti materijala

Eksperimenti sa plodovima kajsije su obavljani sa stalnim režimom tako da su tokom procesa sušenja temperatura agensa i maseni protok agensa održavani na konstantnom nivou u meri koliko je bilo moguće postojećim instalacijama. Na taj način, razlike između pojedinih eksperimenata su određene načinom pripreme plodova za sušenje.

U okviru postavljenog zadatka ispitivanjem su obuhvaćeni:

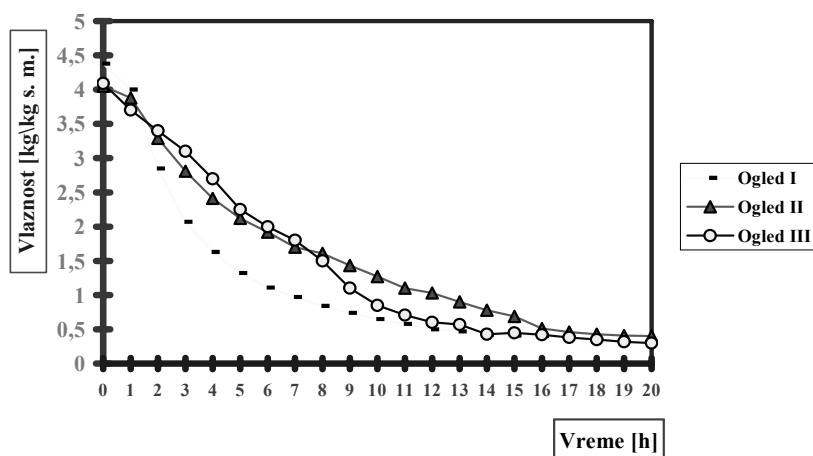
- Parametri okolnog vazduha
- Kretanje temperature sušenog materijala
- Dinamika promene vlažnosti materijala tokom sušenja

Eksperimentalno istraživanje procesa sušenja šljiva i kajsija sprovedena su pomoću laboratorijske univerzalne sušare, i u eksploatacionim uslovima, na prototipskoj sušari UVS-4 [6].

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

3.1. Kinetika sušenja plodova šljive

Primenjujući opisanu proceduru merenja i metodiku obrade mernih rezultata, određene su karakteristike kinetike sušenja plodova šljiva i kajsija. Na slici 1, prikazana je promena vlažnosti plodova šljiva tokom eksperimenata.



Sl. 1. Upporedni prikaz promene vlažnosti plodova šljive za sve režime sušenja

Analizom dijagrama uočava se da je kod eksperimenta za I režim sušenja, na početku procesa (faza predgrevanja) gubitak vlage sporiji, tako da krive promene vlažnosti imaju blagi pad. Nakon završetka predgrevanja kada je temperatura agensa maksimalna (period "intenzivnog" sušenja), intenzitet odvođenja vlage je značajan. Trajanje ovog perioda može se podeliti u tri karakteristična intervala. Prvi, u trajanju od 3 do 5 časova predstavlja period kada je dinamika odvođenja vlage najintenzivnija. Nakon tog intervala nastupa period sa manjom brzinom odvođenja vlage koji traje od 10-og do 13-og h od početka sušenja. Poslednji segment procesa karakteriše se padom intenziteta odvođenja vlage koji teži nuli (period izjednačavanja brzine sušenja sa brzinom unutrašnje difuzije vlage).

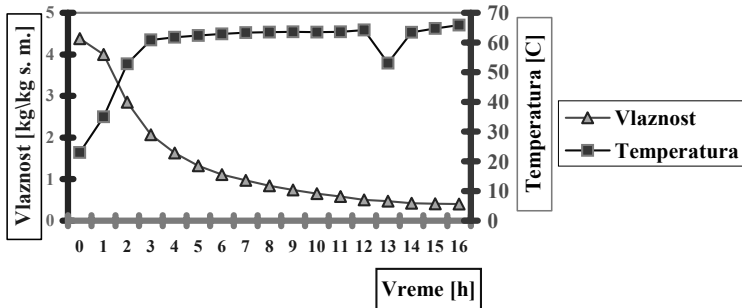
U eksperimentima sa konstantnom maksimalnom temperaturom tokom čitavog trajanja procesa sušenja (bez faze predgrevanja sa nižom temperaturom), sa dijagrama se uočava da je od samog početka odvođenje vlage intenzivno. U periodu od 10-og do 14-og časa, intenzitet procesa je smanjen, da bi se nakon ovog perioda intenzitet približavao nuli. Eksperimenti sa ovim režimom sušenja su sprovedeni u trajanju od 20 h, pri čemu je dobijana prosečna krajnja vlažnost plodova oko 0,31 kg w/kg s.m.

Na dijagramu je prikazana i promena vlažnosti sušenog materijala za eksperimente gde nakon faze predgrevanja postoji prelazna faza u kojoj je temperatura nešto niža od maksimalne (kretala se oko 65 °C). Trajanje ove faze u izvedenim eksperimentima bila su ograničena na period do 8 časova.

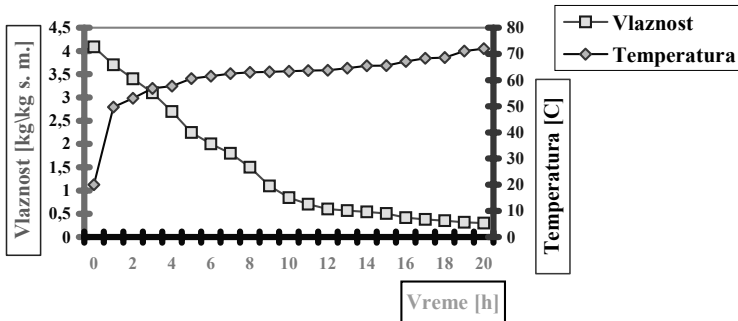
Poređenjem rezultata sa podacima dobijenim eksperimentima za prvi režim sušenja, uočava se da je odvođenje vlage posle faze predgrevanja sporije. Pored toga, evidentno je, da se za postizanje iste krajnje vlažnosti (oko 0,4 kg w/kg s.m.) osušenog materijala, trajanje procesa produžava na 20 h.

Tok promene vlage tokom eksperimenata u kojima, pored faze predgrevanja postoji i faza podhladjivanja u trajanju od 30 min u toku koje je temperatura vazduha snižavana u poseku od 20 °C, uočava se da u trenutku snižavanje temperature vazduha kriva promene vlage nema značajnih promena u odnosu na eksperimente bez faze podhladjivanja.

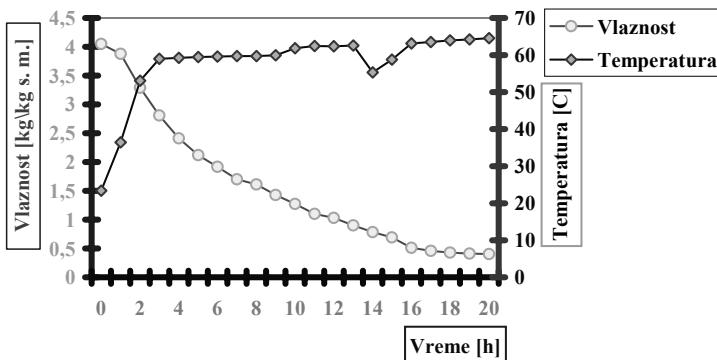
Drugi značajan parametar kinetike sušenja predstavlja temperatura materijala tokom procesa sušenja. Na slikama 2, 3 i 4, data je promena temperature sušenih plodova šljive. Analizom dijagrama uočava se da za sve eksperimente temperatura sušenog materijala raste tokom procesa izuzev za eksperimente sa podhlađivanjem gde se uočava određen pad koji se "poklapa" sa periodom sniženja temperature agensa. Najintenzivniji porast temperature je, sasvim očekivano, nakon završetka faze predgrevanja i podhlađivanja. U toku faze smanjivanja intenziteta odvođenja vlage, temperatura plodova se sa vremenom trajanja procesa sušenja asimptotski približava temperaturi agensa sušenja.



Sl. 2. Promena vlažnosti i temperature plodova šljive u I režimu sušenja



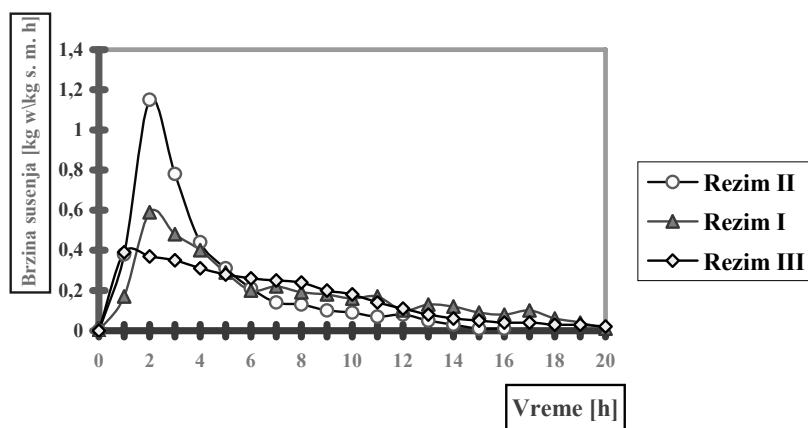
Sl. 3. Promena vlažnosti i temperature plodova šljive u II režimu sušenja



Sl. 4. Promena vlažnosti i temperature plodova šljive u III režimu sušenja

Iz prikazanih dijagrama temperature sušenog materijala, na pojedinim mestima u komori za sušenje, za obe sušare, mogu se uočiti variranja temperature u istom vremenskom periodu za isti eksperiment. Ta variranja kod laboratorijske sušare su neznatna i pre mogu biti greške u merenju nego stvarni rezultati, što je logično s obzirom na male dimenzije, a time i zapreminu komore. Razlika temperatura sušenog materijala kod prototipske sušare, na pojedinim mestima u komori za sušenje kretala se u rasponu $5-10^{\circ}\text{C}$. To se može objasniti neravnomernom rasporedom vazduha za sušenje kao i uticajem gubitaka toplote u okolinu zbog slabe izolacije poda sušare.

Pored kriva vlažnosti i temperatura kinetika sušenja obuhvata i određivanje brzine sušenja koja predstavlja količinu isparene vlage u odnosu na suhu materiju sušenog materijala u jedinici vremena. Brzine sušenja za neke od eksperimenata za plodove šljiva prikazane su na slici 5.



Sl. 5. Brzine sušenja plodova šljiva za različite režime

Analizom dijagrama uočava se da najveća brzina sušenja za date uslove eksperimenata, iznosi oko $1,15 \text{ kgw/kg s.m.h}$ i to nakon $2,5 \text{ h}$ od početka procesa, kod eksperimenata sa II režimom sušenja. Kod eksperimenata sa I režimom sušenja maksimalna brzina procesa nastupa nakon $2,5 \text{ h}$ i iznosi $0,59 \text{ kgw/kg s.m.h}$. Treći režim sušenja karakteriše najveća brzina sušenja od $0,41 \text{ kgw/kg s.m.h}$ dostignuta nakon 1 h .

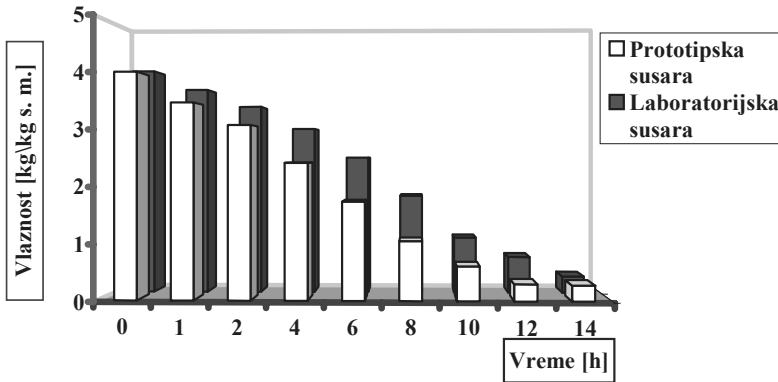
Značajno opadanje brzine sušenja plodova šljive je registrovano posle $10-12 \text{ h}$ od početka procesa. To znači da period nezasićene površine kratko traje, a to treba imati u vidu kada je reč o projektovanju trajanja tehnološkog procesa sa aspekta energetskog bilansa.

3.2. Kinetika sušenja plodova kajsije

Po svojim termofizičkim osobinama, plodovi kajsije su veoma slični plodovima šljive, pa je njihovo ponašanje u procesu sušenja relativno slično. Osnovna i suštinska razlika u tehnološkom postupku sušenja plodova kajsije u odnosu na plodove šljiva je u postupku pripreme kao i obliku plodova. U pripremi plodova kajsije za sušenje neophodno je obaviti hemijsko tretiranje. Sušenje plodova kajsije sa aspekta kvaliteta je jedino prihvatljivo u stanju bez koštice i u obliku polutke sa ili bez ljuštenja

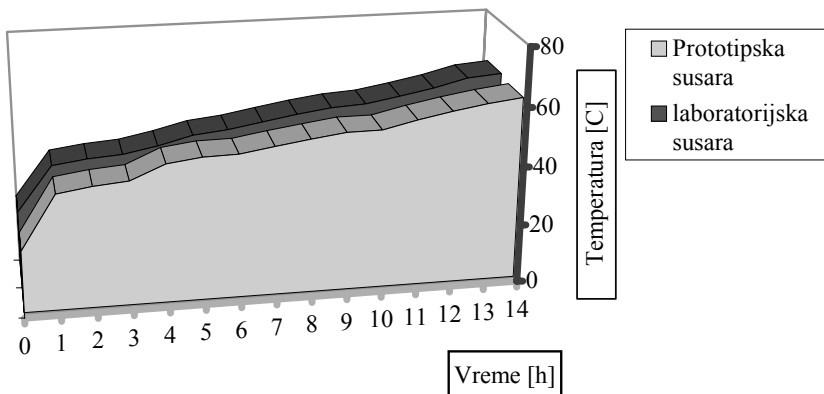
Uzimajući u obzir da su plodovi kajsije podvrgavaju procesu sušenja bez koštica, unapred bi trebalo očekivati značajno različite karakteristike sušenog materijala u odnosu na plodove šljiva (a time i u pogledu vrednosti parametara kinetike sušenja).

Na slici 6. prikazana je promena vlažnosti plodova kajsija tokom procesa sušenja. Iz dijagrama se uočava da oblik krive promene vlažnosti plodova kajsije ima drugačiji oblik od krive sušenja šljiva; promena vlažnosti kajsije pokazuje "pravolinijski" tok odvođenja vlage, pa se teško mogu razlikovati pojedini segmenti krive sušenja kao u slučaju plodova šljive.



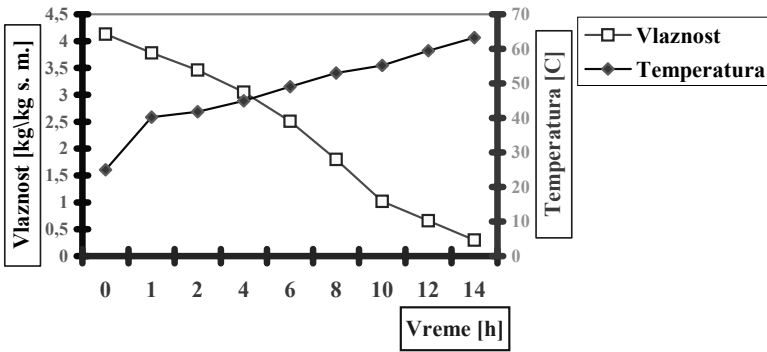
Sl. 6. Promena vlažnosti plodova kajsije pri sušenju kod oba tipa sušare

Period u kome se intenzitet odvođenja vlage asimptotski približava nuli, odnosno prenos vlage od površine ploda u agens sušenja se izjednačava sa unutrašnjom difuzijom vlage u plodovima, nastaje slično kao i kod šljiva nakon 10-14 h od početka sušenja.

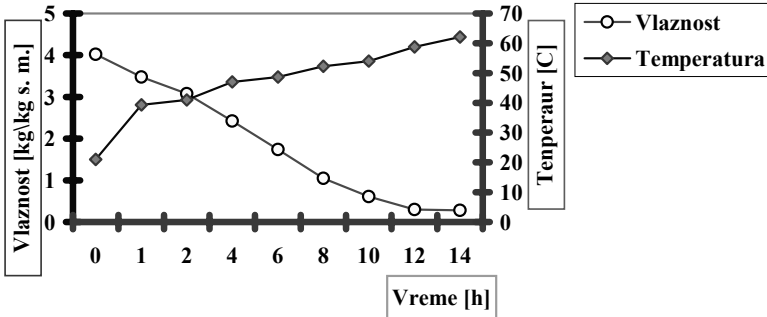


Sl. 7. Promena temperature plodova kajsije u procesu sušenja

Srednja temperatura plodova kajsije za date uslove eksperimenata relativno sporo i monotono raste sa vremenom sušenja i dostiže maksimalnu vrednost od 60 °C, (slike 8 i 9), za razliku od srednje temperature šljive koja brzo dostiže vrednost od 62-65 °C.

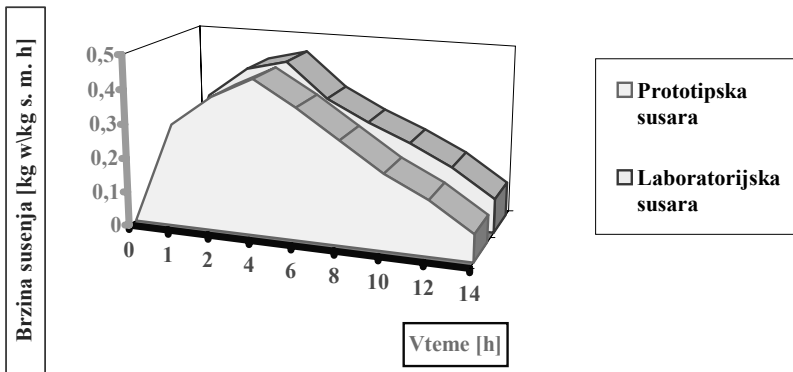


Sl. 8. Promena vlažnosti i temperature plodova kajsije pri sušenju na laboratorijskoj sušari



Sl. 9. Promena vlažnosti i temperature plodova kajsije pri sušenju na prototipskoj sušari

Za sve sprovedene eksperimente vrednost maksimalne brzine sušenja (slika 10) iznosila je približno (0,45 kgw/kg s.m.h). Pri tome, maksimalna brzina sušenja kod plodova kajsije se pojavljuje tek nakon 4 časa od početka procesa sušenja u čemu se razlikuje od brzine sušenja plodova šljive.



Sl. 10. Brzina sušenja plodova kajsije pri sušenju na oba tipa sušara

4. ZAKLJUČAK

Sušenje predstavlja izuzetno složen proces za koji su nedovoljno istraženi i definisani mehanizmi prenosa vlage i toplote u materijalu koji se suši, što je uslovljeno postojećim nivoom znanja i razvoja teorijsko-eksperimentalnih metoda. Biljni materijali kojima pripada i koštičavo voće, predstavljaju koloidno-kapilarno-porozne materijale, pa je zbog kompleksne strukture relevantnih transportnih fenomena analiza procesa sušenja izuzetno složena. Pored toga, sušenje biljnih materijala u statičnom sloju stvara dodatne probleme zbog dodatnih kompleksnih pojava vezanih za strujanja agensa sušenja i konvektivnog prenosa toplote i vlage sa površine vlažnog materijala.

Diskontinuelno vođenje procesa sušenja (kod šljiva) koje uključuje prvu fazu predgrevanja sa maksimalnom temperaturom agensa (do 75 °C) u trajanju do 2 časa, nakon čega se materijal hladi nezagrejanim vazduhom uz intenzivno odvođenje vlage ("znojenje" plodova). Zatim, u drugoj fazi sušenja temperatura agensa treba da je kao u procesu predgrevanja, da bi pred kraj procesa (oko 10 časova od početka sušenja), kada se brzina sušenja znatno opadne smanjiti temperaturu (do 10 °C) agensa sušenja.

Sušenje treba da se obavlja dok se brzina sušenja ne približi nuli (kod koštičavog voća taj period odgovara oko 30% vlažnosti ploda). Rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da se ta vlažnost kod sušenja plodova šljive može postići sa 13 h (ovo predstavlja znatno kraće vreme nego kod sadašnjih tehnologija, a time ušteda i do 30% energije).

Za kvalitet sušenja koštičavog voća veoma je značajan polazni kvalitet materijala (sveži plodovi) i način pripreme plodova za sušenje. Priprema je posebno značajna za plodove kajsije.

LITERATURA

- [1] Antonijević, D., Voronjec, D.: *Kretanje vlaga unutar materijala tokom procesa sušenja sa konduktivnim dovođenjem toplote*, "Procesna tehnika" br. 2 - 3, str. 318-321, Beograd, 1992.
- [2] Bogner, M., Vasiljević, B.: *Osnovi teorije i tehnike sušenja*, Procesna tehnika 2 i 3, 77-85 i 69-78, 1986.
- [3] Bu-Xuan Wang: *Heat transfer Science and Technology*, Hem. Pub. Cop., Washington, 1987.
- [4] Kosi, F., Raičević, D., Ercegović, Đ., Vukić, Đ., Živković, M., Radojević, R., Milenković, R.: *Stanje istraživanja i razvoja tehničko-tehnološki sistema sušenja biljnih materijala*, Poljotehnika, 5-6/95, str. 13-16, Beograd, 1995.
- [5] Kosi, F., Milenković, R., Raičević, D., Ercegović, Đ., Vukić, Đ., Živković, M., Radojević, R.: *Eksperimentalno određivanje parametara sušenja biljnih materijala*, Poljoprivredna tehnika, 1-2 / 95, str. 1-19, Beograd, 1996.
- [6] Institut za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivredni fakultet - Beograd, Institut za proučavanje lekovitog bilja "Dr Josif Pančić" - Beograd: "Univerzalna vučena sušara UVS-4", Inovacioni projekat, 1995.
- [7] Гинзбург, А.С., Савина, И.М.: *Массообменные характеристики пищевых продуктов*, Москва, 1982.
- [8] Лыков, А.В.: *Heat and mass transfer with transportation cooling*, Int. J. Heat Mass Transfer (6), 559, 1963.
- [9] Todorović, M., Kosi, F., Koldžić, G.: *Fizički fenomeni i matematičko modeliranje procesa sušenja korišćenjem sunčeve energije*, Naučno stručni skup PTEP '97, Tara, str. 7-13 1997.
- [10] Živković, M.: *Određivanje optimalnih parametara tehničko-tehnoloških sistema za sušenje koštičavog voća*, Doktorska disertacija, Beograd, 1998.

KINETICS OF STONE FRUIT DRYING

Milovan Živković, Franc Kosi

Faculty of Agriculture - Belgrade

Abstract: The results of the investigation of technical and technological parameters in the low temperature drying processes of stone fruit (plum and apricot) under both laboratory conditions and in a universal prototype dryer have been presented in the paper. The measurements comprised flow and thermal measurement, technological and kinetic drying parameters and energy consumption. Major emphasis has been on temperature and relative humidity of the drying agents and humidity and temperature of the drying material.

According to results, the preheating period has been found to be approx. 2-3 hours being affected by the type of the material and the drying regime, i.e. by the state of drying agents. Maximal plum drying rate has been after 2 h and amounted to about 1.15 kg w/kg d.b.h. In the case of apricot drying, maximal drying rate has been approx. 0.45 kgw/kg d.b.h. and was registered after 4 hours from the very beginning of the drying process. In addition, the curve of apricot drying kinetics has been differed from the curve of plum drying kinetics.

The quality of dry fruit under low temperature drying conditions has been found to meet standard requirements primarily respecting sugar and acid loss and the fact that there was no odour or contamination of fruit.

In addition to the technical solutions, the fruit drying process was found to be affected by how the process itself is being managed the duration of which may be shortened contributing to the quality of the products, energy production and profitability.

Key words: *low temperature drying, stone fruit, flow thermal measurements, draing kinetics.*