Plants, 1984, CSSA, Spec. Publ. 7. CSSA and ASA, Madison, WI.
[8] Fawcett R, Towery D: Conservation tillage and plant biotechnology: how new technologies can improve the environment by reducing the need to plow. Conservation technology information centar, 2002. www.ctic.purdue.edu
[9] Ivanović M, Vasić N, Trifunović V, Vidojević Ž, Vuković M, Jakovljević L, Jovandić N: Inbred lines of maize significans for Yugoslavian maize breeding programm. Naučni Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, „Zbornik radova“, 2002, Sveska 36.
[10] James C: Global status of commercial Biotech/GM crops 2005. ISAAA Briefs No.34, 2005.
[11] Jones, D.F: The effects of inbreeding and crossbreeding upon development. Connecticut Agric. Exp. Stn. Bull. (1918), No. 207: 5-100.
[12] Kojić, L: Dosadašnji rezultati i mogućnosti unapređenja proizvodnje kukuruza u Jugoslaviji. Nauka u praksi, 1991, 21 (3): 295-312.
[13] Rice M: Transgenic rootworm corn: assessing potential agronomic, economic and environmental benefits. Plant Health Progress, 2004. doi:10.1094/PHP-2004-0301-01-RV
[14] Rosić, K: Hibridi kukuruza. Kukuruz. Kolektiv autora, Zadružna knjiga, Beograd, (1965),147-166.
[15] Shapouri H: US ethanol enviromental cost&benefits and economic viability. AIE A2 International coference and workshop of the CAES, Quebic, Canada, 20-24.8. 2004.
[16] Shull, G.F: The composition of a field of maize. Am. Breed. Assoc. Rep., (1908), 4: 296-301.
[17] Shull, G.F: A pure line method of corn breeding. Am. Breed. Assoc. Rep., (1909), 5: 51-59.
[18] Statistički zavod Republike Srbije. Statistički godišnjak Srbije, 2005.
[19] Trifunović V: Četrdeset godina moderne selekcije kukuruza u Jugoslaviji. Genetika i oplemenjivanje kukuruza. Dostignuća i nove mogućnosti str. 5-46, Beograd, 11 i 12. decembar, 1986.

Primljeno: 3.03.2006. Prihvaćeno: 15.03.2006.

Biblid: 1450-5029 (2006) 10; 1-2; p.9-15 Pregledni rad
UDK: 664.854:631.365 Review

NOVI KONCEPTI ZA SUŠENJE VOĆA
NOVEL CONCEPTS FOR FRUITS DRYING

Dr Ljiljana BABIĆ, dr Mirko BABIĆ, Ivan PAVKOV, dipl. ing.
Poljoprivredni fakultet, 21000 Novi Sad, Trg D. Obradovića 8

REZIME

Sušare sa dominantno konvektivnom transportom toplote i mase su najmasovnije zastupljene kod sušenja bio materijala i to već skoro pet decenija. U tom periodu su učinjeni svi mogući pomaci na planu smanjenja potrebne toplotne energije i poboljšanja kvaliteta izlaznog materijala. Dalji pomaci na tom polju skoro da nisu mogući, te se zaključuje da su ovakve sušare dostigle svoj maksimum. One su odavno svetske rekorderke. Dalji razvoj tehnologija koje će omogućiti zadovoljenje viših nivoa energetskih i kvalitetnih zahteva tržišta se traži u primeni drugih vidova energije koja će intenzivirati razmenu vlage – mase. Međutim, korišćenje drugih energija je povezano sa ponašanjem bio materijala u njihovom polju. Zbog toga se u svetu, a i kod nas istražuju i analiziraju procesi sušenja različitih bio materijala u «novim uslovima». Sakupljanje ovakvih informacija je osnova za konstrukciju racionalne sušare. To je dugačak put koji zahteva ulaganja, intelektualna i materijalna. Prva rešenja su već poznata u svetskoj literaturi, ali se za njih vrlo često konstatuje da su još uvek skupa.

***Ključne reči**: sušenje voća, nove sušare, nove tehnologije.*

SUMMARY

Convective heat and mass transport dryers are pre dominant in bio products drying for more than five decades. Significant efforts have been done for their improvements, especially energy consumption reduction and better out coming product quality. Further steps in that direction are almost impossible, those dryers had reached maximum of capability. One can say those dryers are world record owner. New technologies will give an answer on market demands for better quality bio product on lower drying costs. In order to achieve those targets they will employ some other energy assisted to intensify moisture transportation out. In that case, the changes of bio product physical properties and their behavior when expose to field of other energies are most important. The studies that analyze bio products behavior during "different condition" have carried out all over the world. This collection of research results will served for energy efficient dryer. This is a hard way, which demands investments, intellectual, and finance. New dryer based on other than heat energy sources are presented in many papers and books, bet they have one thing in common, they are still expensive.

***Key words:** fruits drying, novel dryers, new technologes.*

UVOD

Sušenje je stari proces i već samim tim je neposredno povezan sa inovacijama. Da se nije stalno unapređivao, verovatno bi nestao. Danas se u svetu suši veliki broj različitih materijala primenom postojećih tehnologija koje naizgled dobro funkcionišu, pa je često teško zaključiti da postoji potreba za poboljšanjem. Na istraživačko razvojnom polju se međutim dosta radi. Tako se u US Patent Office (Kudra, 2002) svake godine prizna oko 250 patenata koji u svom naslovu imaju reč „sušenje" ili „sušara". Međutim, postoji negativna korelacija između zainteresovanosti industrije za novim proizvodom i nivoa akademske istraživačke aktivnosti. Smatra se da, pre bilo kakvih analiza, postoji potreba za definisanjem pojma inovacije, da se naznače tipovi i identifikuje potreba za njima u sušenju.

MATERIJAL I METOD

Šta je inovacija?

Definiciju inovacije, verovatno, prvo treba potražiti u najpoznatijem svetskom rečniku, Webster's Dictionary, a tamo piše: inovacija (imenica) – uvođenje nečeg novog, nove ideje, metode ili uređaja. Definicija nema prideve kao što su „bolje", „superiornije", „jeftinije", „kvalitetnije". U svakodnevnom inženjerskom ophođenju obično se pod ovim pojmom podrazumeva da je to neki novitet ili originalni koncept koji ima niz tehno-ekonomskih prednosti u odnosu na postojeće rešenje. Zato je objašnjenje ovog pojama koji pruža Oxford University Press, bliže prethodnoj konstataciji, jer je inovacija izjednačena sa „pravljenjem promena". Sličan pristup imaju Howard i Guile: „Inovacija je proces koji počinje pronalaskom, nastavlja se daljim razvojem tog pronalaska i rezultira u novi proizvod, novi proces ili u novu uslugu na tržištu". Da bi se dokazala na tržištu, svaka inovacija mora da bude jeftinija.

Šta bi se moglo definisati kao inovacija kada je u pitanju sušenje? Inovacije su sve ono što ima sledeće atribute (Kudra, 2002):

-novi proizvod ili proces koji nije do sada postojao,
-oprema koja ima mnogo veći kapacitet nego što to dozvoljava postojeća,
-proizvod ili proces koji omogućuju bolji kvalitet izlaznog materijala i kvalitetniju kontrolu rada u odnosu na postojeća rešenja,
-snižen nivo negativnih uticaja uređaja ili procesa na čovekovu okolinu,
-omogućuje bezbedan rad za ljude,
-ima bolju energetsku efikasnost,
-ima niže troškove proizvodnje,
-proizvod, proces ili usluga imaju veću fleksibilnost, mogućnost da rade sa različitim materijalima i sl.

Inovacija je od velikog značaja kod svih onih industrija koje imaju kratkotrajne „životne" cikluse (manje od godinu dana, kao što je slučaj sa elektronikom i računarskim proizvodima). Kod industrija sa dugotrajnim „životnim" ciklusom (10 do 20 godina, što je slučaj sa tehnologijama sušenja), inovacije pristižu sporo i sporo se uvode. U ovom slučaju inovacijski menadžment zavisi od stanja, koje može da bude:

Početno stanje, kada se vrednost na tržištu vrlo brzo komercijalizuje,

Razvojno stanje, kada se vrednost na tržištu ostvaruje većom produkcijom ili povišenjem cena i

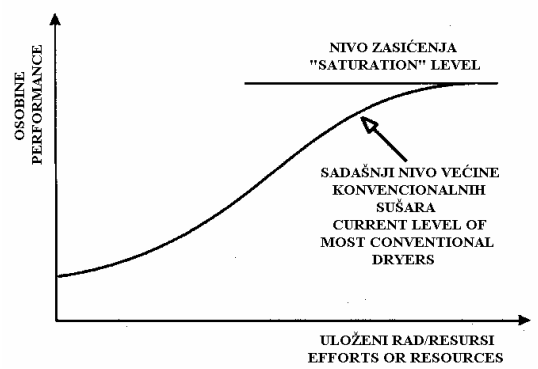
Stanje zrelosti, ostvarena vrednost na tržištu je mala, te postojeći proizvod, proces ili uslugu treba zamenuti.

Postoje istraživači koji smatraju da se inovacioni proces sastoji iz: 1- otkrića prirodnog zakona, 2 – pronalazaštva i 3 – razvoja proizvoda, procesa il usluge za tržište i da među ovim fazama postoji linearna zavisnost. Međutim, dobro je poznato da su mnoge revolucionarne tehnologije zaživele pre no što su se pojavala teoretska objašnjenja. Zato ima i onih koji zagovaraju inovaciju kao nelinearnu zavisnost, manje više haotičnu. Ali većina se slaže da su kvalitativni parametri inovacije sledeći:

-inovacija proizvodi potpuno novu kategoriju proizvoda, procesa ili usluga,
-inovacija predhodi svim novim kategorijama,
-inovacija predstvalja značajno poboljšanje postojećih tehnologije,
-inovacija predstavlja blago poboljšanje postojećeg proizvoda, procesa ili usluga.

Tehnološke promene koje uvodi inovacija mogu da budu revolucionarne ili evolutivne. Evolutivne su svakodnevnije, pojavljuju se za kratko vreme često na zahtev tržišta. Za razliku od njih revolucionarne su ređe u pojavi, i tada dugo traju. One često nailaze na značajan otpor na tržištu. Zahtevaju značajan naučno istraživački rad i velike marketinške napore. Vreme od pojave koncepta do tržišta je često vrlo dugo. Tipičan primer za ovo je helikopter, od koncepta do realizacije je proteklo 500 godina. Zašto se ovo dešava, još uvek nije jasno.

Postavlja se pitanje da li je moguće proceniti potrebe tržišta za primenom inovacije, ili da li je moguće predvideti da je postojeća tehnologija „zrela". Za tu svrhu može da posluži kriva na slici (sl. 1) (Kudra, 2002), poznata pod imenom Foster-ova kriva. Ona prikazuje zavisnost između osobina proizvoda ili procesa i napora potrebnih za razvijanje tih proizvoda ili procesa. Kada se ostvari tehnološka zrelost (saturaciona vrednost) nikakva količina istraživačkih i razvojnih napora (izvora) ne može da povisi nivo osobina proizvoda ili procesa. Kada se to desi vreme je za potragu za alternativnim tehnologijama. Tada se događa diskontinuitet, kada industrija zamenjuje jednu krivu drugom. Većina tehnologija za sušenje se danas nalaze vrlo blizu saturacione vrednosti, bez obzira što su vrlo dobro tehnički rešene.



Sl. 1. Kriva tehnološke zrelosti (Kudra 2002)
Fig 1. Technology mature curve (Kudra 2002)

Danas je izuzetno teško, skoro i nemoguće predvideti kakva će se zamena tehnologija obaviti i u kom pravcu će ići naučno-istraživački rad u sledećih nekoliko decenija. Međutim, generalno se može reći da će sve promene da se odvijaju na planu veće energetske efikasnosti, manjeg zagađenja okoline pre svega zbog strožije regulative, na planu primene obnovljivih izvora enegrije i na planu poboljšanja kvaliteta finalnog proizvoda, ali uz manje troškove. Trenutno je najvažnja pogonska sila koja proizvodi inovacije, ostvarenje boljeg kvaliteta proizvoda, pre svega zbog zahteva tržišta.

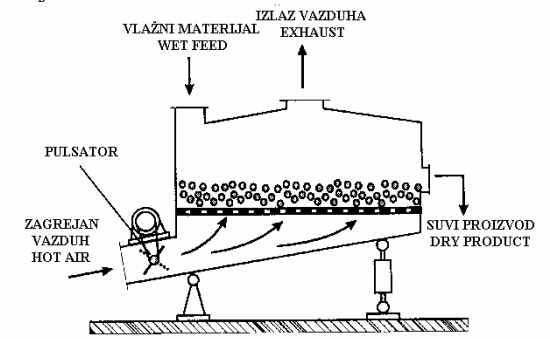
Nova rešenja sušara za voće

Sušara sa pulzirajućim fluidizovanim slojem

Sušare sa fluidizovanim slojem materijala su uobičajene u nekim industrijama, jer zbog vrlo intenzivnog brzinskog i temperaturskog polja radnog fluida ostvaruju intenzivnu razmenu toplote i mase sa materijalom. U poljoprivredi nisu našle širu primenu, zbog svojih već poznatih ograničenja: delići materijala koji se suši su oblika lopte ili kocke, ujednačeni su po dimenzijama, a uz to se ne slepljuju. Međutim, nova rešenja ovih sušara sa pulsirajućim fluidizovanim slojem omogućiju sušenje iseckanog voća i povrća, kao i zrna pšenice, ječma, šećerne repe i drugog.

Ideja (Belik, 1960) za ovakvu sušaru je stara oko 50 godina, a sastoji se u tome da se primeni protok radnog fluida povremeno i time će se ostvariti pulsirajući fuidizovan sloj. Na slici (sl. 2) se uz pomoć jednog leptirastog ventila radni fluid povremeno upušta u sušaru, gde nakon prolaska kroz perforirani

pod nailazi na sloj materijala brzinama u domenu fluidizacije za taj materijal.

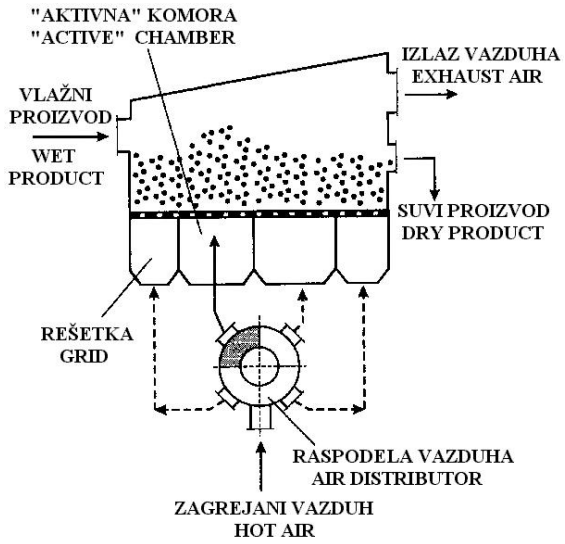


Sl. 2. Pulsirajuća fluidizovana sušara sa leptirastim ventilom (Buhler-Miag GmbH)

Fig 2. Pulsed fluid bed dryer with a butterfly valve (Buhler-Miag GmbH)

Brzina kretanja radnog fluida se kroz sloj menja od nule do neke vrednosti, što ima za posledicu učestalo podizanje i padanje sloja, to jest njegovo rastresanje. Ove promene off-on mogu biti od 0,5 do 4 u sekundi.

Slično tehničko rešenje ovom je i sušara sa premeštanjem vazduha za fluidizaciju (sl. 3). U suštini sušara je slična konvencionaloj, osim što je dovod vazduha pomoću četiri kanala. Vazduh za sušenje ulazi u rotirajući distributor , koji ga šalje u neki od kanala, to jest u radni prostor sušare.



Sl. 3. Princip pulsirajuće fluidizovane sušare sa premeštanjem vazduha za sušenje (Gawrzynski, 1996)

Fig 3. Principle of the pulsed fluid bed with relocated air steam (Gawrzynski, 1996)

Sloj materijala iznad tog kanala je tada fluidzovan, a slojevi iznad ostalih su nepokretni. U praktičnom radu međutim, zbog česte relokacije vazduha koja iznosi 6 do 12 Hz i zbog inercije sloja koji se suši, nema sloja koji je stagnantan. Ovakvim radom je omogućen „glatkiji" prelaz sloja materijala iz stagnatnog u fluidizovani. Za oba tehnička rešenja sušara bi se pre moglo reći da su vibrirajuće, a ne fluidizovane, jer su brzine kretanja vazduha u neporemećenom sloju 0,-3,5 m/s što zavisi od dimenzija seckanog bio materijala, visina sloja materijala je 0.1-0,4 m, frekvencija pulsirajućeg vazduha je 4-16 Hz, a kapacitet 150 kg/h (suvog seckanog korena peršuna ili celera) Kinetičke krive sušenja kod pomenutih autora su slične onim koje su ostvarene kod klasične fluidizovane sušare.

Sušara sa toplotnom pumpom

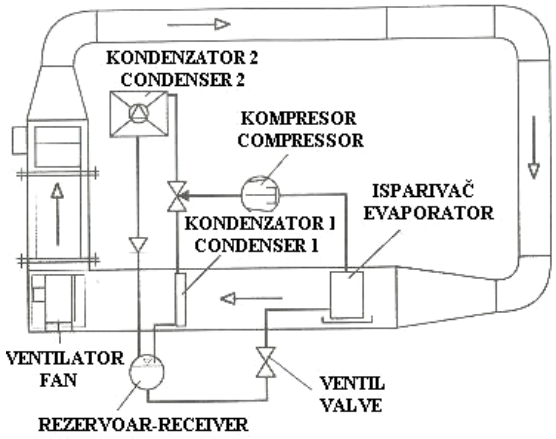
Ugradnja toplotne pumpe kod sušara je poznata već duži niz godina, naročito u slučajevima kada ulazno stanje vazduha mora da ima konstatne vrednosti tokom dužeg vremenskog perioda (tokom cele godine, na primer). Primenu je našla kod sušara za drvenu građu. Opšti zahtev tržišta za osušenim bioproizvodom visokog kvaliteta je reanifirmisao njenu primenu i u drugim slučajevima (tabela 1). Novija istraživaja su pružila rešenja koja imaju veću energetsku efikasnost, širok dijapazon temperatura vazduha na ulazu u sušaru od -20°C do 100°C, jednaka pogodnost rada sa proizvodima visoke i niske vrednosti na tržištu, ostvarenje aseptičnog procesa, eliminisanje mogućnosti požara na sušari i slično. Naime, hermetičnost sušare koja se zahteva kod izuzetno osetljivih proizvoda (specijalno na O_2) omogućuje sušenje azotom ili ugljen-dioksidom.

Tabela 1. Skorašnja istraživanja sušara sa toplotnom pumpom (Kudra, 2002)

Table 1. Recent studies in heat-pump drying (Kudra, 2002)

Izvor Source	Lokacija Location	Primena Application
1. Chou (1998), Chua (1998)	Singapore	Voće, gljive, morski krastavac, ostrige
2. Carrington (1996), Sun (1996)	New Zealand	Drvena građa
3. Prasertsan (1997), Saen-Saby (1996)	Thailand	Bio proizvodi, banane
4.Mason and Blarcom (1993)	Australia	Bio proizvodi
5. Meyer and Greyvenstein (1992)	South Africa	Zrna
6. Rossi (1992)	Brazil	Luk i drugo povrće
7. Nassiikas (1992)	Greece	Papir
8. Strommen, Krammer (1994)	Horway	Ribe i drugi morski proizvodi

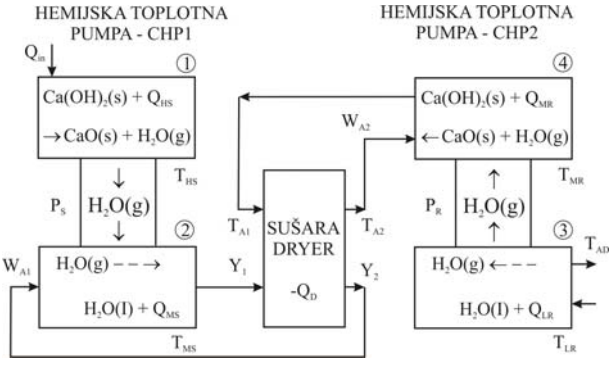
Na slici (sl. 4) prikazana je sušara u fluidizovanom sloju razvijena od strane Norwegian Institute of Technology snabdevena toplotnom pumpom. Ovako kompletirana predviđena je za sušenje proizvoda zamrzavanjem, pa je temperatura vazduha za fluidizaciju -5°C. Time se ostvaruje najmanje smanjenje prvobitne zapremine bioproizvoda, a pošto je dalje sušenje zamrzavanjem sporo, nastavlja se sa drugom „fazom" dosušivanja pri temperaturi vazduha 20-30°C. Ovakvom tehnologijom se zadržava prvobitni kvalitet izuzetno osetljivih materijala kao što su bakterije, voće, povrće, farmaceutski proizvodi, začinsko i lekovito bilje. Za sada je jedini nedostatak sušare viša cena procesa, te na tom planu predstoji još istraživačkog rada.



Sl. 4. Fluidizovana sušara sa toplotnom pumpom (Strommen, Jonassen, 1996)
Fig 4 Heat pump fluid bed dryer (Strommen, Jonassen, 1996)

Interesantna inovacija nazvana hemijska toplotna pumpa je nastala na Kyushu Institute of Technology i Nagoya University (Ogura, 1991). Ona može da skladišti toplotnu energiju u obliku hemijske uz pomoć endotermne reakcije koja se odvija u odgovarajuće projektovanom reaktoru. Sušara je snabdevena sa dva reaktora čija je principijela šema data na slici (sl. 5).

Hemijska toplotna pumpa može da radi u dva modusa, kada se skladišti toplotna energija visokog potencijala i kada se ona produkuje iz reaktora. U prvom modusu skladištenja neka količina toplotne energije $-Q_{ulazno}$ se unosi u reaktor i na osnovu termohemijske jednačine utiče na dekomponovanje reaktanta -AC, te je rezultat te reakcije reaktant –A i gas –C. Gas –C se sa visoko temperaturnog dela reaktora transportuje u nisko temperaturni deo gde stupa u hemijsku reakciju sa novim reaktantom –B i pri tome oslobađa neka količina nisko potencijalnue toplotne energije. U drugom modusu kada se sušari isporučuje visoko potencijalna toplotna energija, taj isti gas –C se sada transportuje iz nisko temperaturnog dela reaktora u visoko temperaturni, gde stupa u reakciju sa reaktantom –A, pri čemu se oslobađa visoko potencijalna toplotna enegija $-Q_{izlaz}$ i nastaje reaktant –AC.



Sl. 5. Princip rada hemijskih toplotnih pumpi (CHP1 i CHP2) sa $CaO/H_2O/Ca(OH)_2$ (Ogura, 2000)
Fig 5. Principle of the chemical heat pumps (CHP1 and CHP2) with $CaO/H_2O/Ca(OH)_2$ (Ogura, 2000)

Eksperimenti koji su obavljeni u Japanu sa hemijskom toplotnom pumpom su kao reaktante koristili CaO, H_2O i $Ca(OH)_2$. Prvoj hemijskoj toplotnoj pumpi CHP1 na slici 5 dovođena je izvesna količina toplotne energije $-Q_{HS}$ tako što je gorionikom zagrevan CaO na temperaturu od 594°C. Vodena para koja se pri tome oslobodila je napustila reaktor i kondenzovala se u drugom delu reaktora i pri tome se oslobodila neka količina toplotne energije dovoljna da zagreje određenu količinu vazduha za sušaru do 150°C. U drugoj hemijskoj toplotnoj pumpi CHP2 iz reaktora se oslobodila količina toplote dovoljna da zagreje neku količinu vazduha za sušenje do 360°C, tako što je u kontrolisanim uslovima bila dovoljna toplota okolnog vazduha u sobi od 20°C za prelazak vode iz tečne u gasnu fazu, koja je u drugom delu reaktora stupila u reakciju sa CaO čiji je rezultat neka količina toplote i $Ca(OH)_2$.

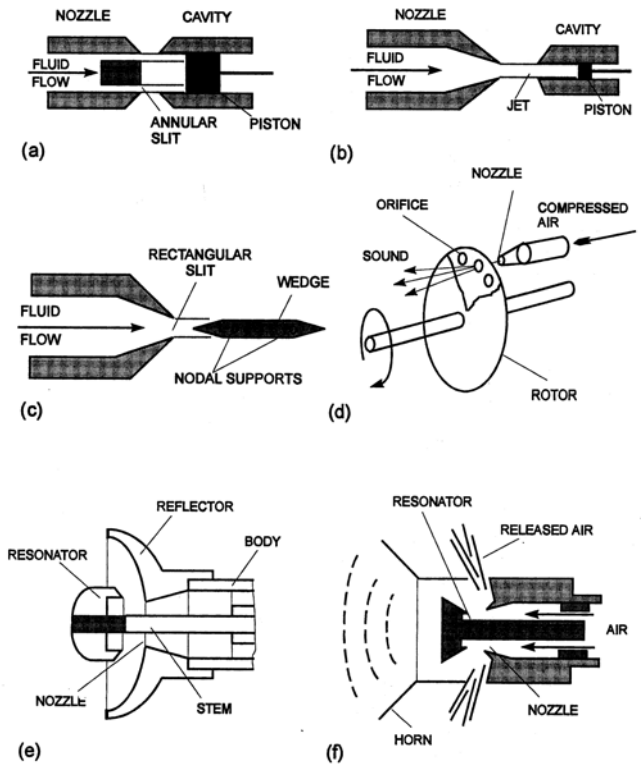
Smatra se da bi energetska efikasnost hemijske toplotne pumpe bila i viša kada bi se ukomponovala sa nekim drugim tipom sušare, a ne klasičnom sa konvektivnim prenosom toplote.

Sušenje zvukom

Zvuk je pojavni oblik energije koja nastaje transformisanjem fluksa pritiska u vazduhu, vodi ili nekom drugom elastičnom medijumu. Svako pomeranje čestica elastičnog medijuma u odnosu na prvobitan položaj predstavlja promenu u pritisnom fluksu, a u zavisnosti od njegovog smera dolazi do kompresije ili dekompresije u delovima elastičnog medijuma, što se reflektuje kao zvučni talas. Na mikro planu jačina zvuka zavisi od intenziteta pritiska u medijumu i od brzine kretanja elementarnih čestica. Na makro planu zvuk se karakteriše frekvencijom – f (Hz) koja je direktno proporcionalna brzini kretanja zvuka – u (m/s), a obrnuto proporcionalna talasnoj dužni – λ, kao i ampitudom i intenzitetom zvuka. U zavisnosti od učestalosti pulsiranja pritisnog fluksa, zvuk koji nastaje može se klasifikovati kao infra zvučni (f<20 Hz), čujni (20 Hz<f<20 kHz) i ultra zvučni (f>20 kHz). Istraživanja mogućih primena zvučne energije za sušenje su se bavila frekvencijama preko 15 kHz, međutim, u polednje vreme koriste se niže frekvencije 50-200 Hz, pa čak i vrednosti u domenu infra zvuka. Za sada se sa sigurnošću zna da visoko intenzivni ultra zvuk menja osobine biomaterijala kroz koji prolazi.

Industrijski generatori zvučne energije pretvaraju neku vrstu energije u oscilatorno kretanja čestica u elastičnom medijumu i generalno se dele u šest grupa:

1. Piezoelektrični generatori – u njima se obavlja periodična promena oblika kristala (kvarc, zinkov oksid) zbog dovođenja električne energije. Promena oblika stvara mehaničke vibracije koje proizvode zvučnu energiju frekvencije 20 kHz do 20 MHz.
2. Magnetni generatori – mehaničke vibracije nastaju zbog oscilovanja molekula oko ravnotežnog položaja nekih metala, kao nikl ili kobalt, koje su rezultat dovedene magnetne energije, a frekvencija zvučnog polja je 40-100 kHz.
3. Elektromagnetni generatori – vibraciju nekog čvrstog materijala (membrana) izazivaju električna i magnetna energija, a proizvedeni zvuk je f < 50 kHz.
4. Elektrostatički generator – vibracije nastaju zbog naizmenične promene kapaciteta kondenzatora, transformisana zvučna energija ima frekvenciju f < 100 kHz.
5. Mehanički generator – zvučna energija se generališe uz pomoć mehaničke, rotiranjem raznih čvrstih materijala ili uz pomoć kinetičke energije fluida (pištaljka), a frekvencija zvučne energije je manja of 50 kHz (sl. 6).
6. Raznovrsni generatori – koji transformišu toplotnu, hemijsku, optičku ili neki drugi oblik energije bilo i mehančku prvo ili direktno u zvučnu energiju.



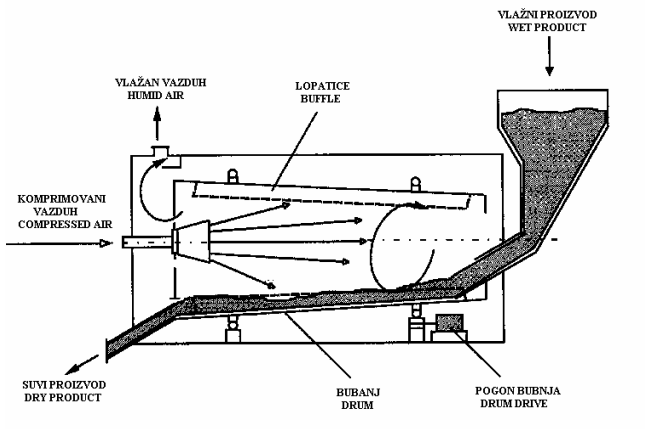
Sl. 6. Princip rada mehaničkih generatora zvuka (Kudra, 2002) a) Galton-ova pištaljka- Galton whistle, b)Hartman-ova pištaljka – Hartman whistle, c) klinasti rezonator –Wedge resonator, d) dinamička sirena – Dynamic siren, e) modifikovana Hartman-ova pištajka – Modified Hartman whistle, f) Branson-ov zvučni generator – Bronson sound generator

Fig 6. Principles of sound generation in mechanical sound generators (Kudra, 2002)

Nozzle-Štrcaljka, Fluid flow-Protok fluida , Piston-Klip , Soud-Zvuk, Horn-Truba, Wedge-Klin, Slit-Otvor, Stem-Držač, Resonator-Odjekivač

Objašnjenja o tome kako se materijal suši uz pomoć zvuka je dato od strane mnogih autora uglavnom u postulatima (Borisov, 1962, 1967, 1973). Smatra se da u unutrašnjosti materijala dovedena zvučna energija izaziva oscilovanje molekula vode oko nekog ravnotežnog položaja. Predata količina energije molekulima vode omogućava raskidanje veze sa molekulima čvrste faze, te oni počnu da migriraju sa mesta višeg potencijala na mesto nižeg potencijala, to jest u smeru ka graničnoj površini. Ako su u pitanju molekuli pare u materijalu, ova predata energija im omogućava pulsiranje, tako da njihovim pomeranjem u odnosu na predhodnu položaj u kapilari slobađaju „prolaz" ostalim molekulima ka površini. Kada je u pitanju isparavanje vlage sa spoljne površine, predpostavka je da pulsiranje zvuka smanjuje laminarni sloj uz materijal, a time i prepreku molekulima pare za lakše napuštanje graničnog sloja.

Istraživanja su pokazala da sušenje zvukom u kombinaciji sa konvektivnim ima takav efekat, da zvučna energija više utiče na brzinu sušenja biomaterijala no povišenje temperaturnog i strujnog polja fluida. Ovo se naročito odnosi na nisko temperaturno sušenje koje omogućuje bolji kvalitet osušenog materijala. Uopšte se može konstatovati da je ponašanje biomaterijala u zvučnom polju ono što tek treba ispitati. Borisov (1965) i saradnici su ustanovili da pritisak zvučne energije od 145-150 dB uslovljava brzinu kretanja vazduha od nekoliko metara u sekundi. Kada se biomaterijal nađe u takvom polju menjaju mu se hidrodinamičke osobine. Tako, zvučno polje od 111 dB, može čestice dimenzija 2-1000 μm i gustine 1200-2700 kg/m^3 da fluidizuje. Zbog ovakvog efekata zvuka, dubine prodiranja talasa kroz biomaterijal i površinskih fenomena koji se javljaju, konstrukcija sušara je bio zahtevan posao. Pored toga, oblik je morao da bude takav da ostvari i održi stojeće talase. U tom smislu se cilindar pokazao kao najbolje rešenje (slika 7).



Sl. 7. Zvučna rotaciona sušara (Borisov, 1976)

Fig 7. Sound-assisted rotary dryer (Borisov, 1976)

Srednji prečnik cilindra sušare na slici 7 je 0,2 m, a dužina 1,2 metara. Motor sa promenljivim brojem obrtaja održava 80 obrataja po minuti, a temperatura vazduha za sušenje je 150°C. Pneumatski generator zvuka je ugrađen na suprotnoj strani cilindra u odnosu na ulaz biomaterijala. Na osnovu rezultata istraživanja konstatuje se da su pri pritisku zvučnog talasa od 169 db i frekvenciji od 10,9 kHz postignute sledeće vrednosti:

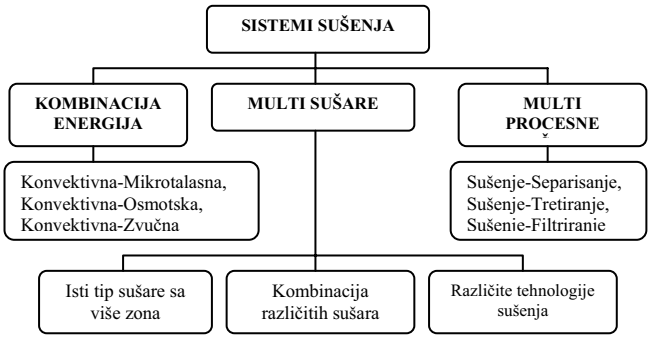
1.masa zrna pirinča početne vlažnosti 27,6% se za 11 minuta osušila na 14,5%,

2. izmrvljeni sir početne vlažnosti 16,8% se za 16,2 minuta osušio na 1,53%.

Na osnovu pregleda dostupne literature može se zaključiti da akustično sušenje ima prednosti nad ostalim načinima. Međutim, kako je energetska efikasnost većine generatora zvuka od 25-35%, sušare su još uvek neracionalnije u poređenju sa onim koje rade sa drugim oblicima energije. Pored toga, dubina prodiranja zvučne energije u materijal je ograničena, te su za sada samo tanki materijali pogodni za sušenje. Izolacija sušara koje su opremljene čujnim i ultra zvučnim generatorima je skoro nemoguća, te su sa tog aspekta agresivni u odnosu na okolinu, a takođe izazivaju vibracije mehaničkih delova opreme.

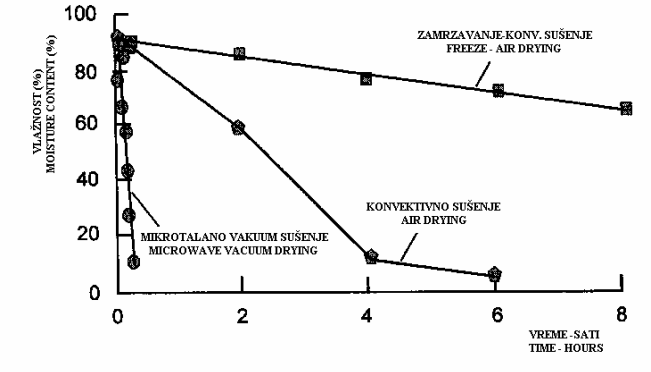
Novi kombinovani sistemi sušenja

Jedan od načina prevazilaženja sadašnjeg stanja, a sve u smislu racionalnije potrošenje energije je stvaranje kombinovanih sistema. Oni mogu biti kombinovani u smislu korišćenja više vrsta enegija, mogu da sačinjavaju sistem koji pored sušenja obavlja i neku drugu tehnološku operaciju, a mogu da budu multi sušare (slika 8).



Sl. 8. Novi hibridni sistemi sušenja
Fig 8 .Novel hibrid drying systems

Kao primer racionalizacije energije potrebne za sušenje u slučaju njihove kombinacije neka posluži slika 9. Kolutovi mrkve debljine 3 mm su se sušili u struji zagrejanog vazduha konvektivno, zamrzvanjem i mikrotalasno-vakuum sušarom (Durance, 1999). Mikrotalasno-vakuum kinetička



Sl. 9. Krive sušenja kolutova mrkve (Durance, 1999)
Fig 9. Drying rates for carrot slices dehydration (Durance, 1999)

kriva je skoro prava linija povučena sa početnih 88% vlažnosti do krajnje vlažnosti od 9%. Sušenje sličnih uzoraka zamrzvanjem je trajalo oko 3 dana pri istim vrednostima vlažnosti biomaterijala, konvektivno sušenje je zahevalo oko 8 sati, a mikrotalasno-vakuum 33 minuta. Do sličnih rezultata se dolazi i uporebom radio frekventne energije.

ISTRAŽIVANJA SA MULTI SUŠARAMA U NAŠOJ ZEMLJI

Kao primer multi sušare čiji se sistem sastoji iz osmotskog i konvektivnog uređaja, kao i ponašanje polutki kajsije kao biomaterijala, daje se na slici 12 (Babić, 2002, Babić 2003, Babić 2005). Istraživanje uticaja temperature i koncentracije rastvora pri osmotskom sušenju na način otpuštanja molekula vode iz uzoraka kajsija je obavljeno pri laboratorijskim uslovima. Planom eksperimenta su izabrani uticajni faktori i njihovi nivoi. Prvi uticajni faktor je bio sorta kajsije. Kao rastvorak je usvojena saharoza, a njena koncentracija u destilovanoj vodi je izabrana na dva nivoa i to c = 70% i c = 85% od maksimalne koncentracije na izabranim nivoima temperature rastvora. Temperatura rastvora, kao uticajni faktor osmotskog sušenja, je takođe izabrabna u dva nivoa i to t = 45°C i t = 55°C.

Faktorni eksperiment je obavljen pri dva nivoa temperature i dva nivoa koncentracije rastvora. Osmotska dehidracija je obavljena u sudu koji je projektovan i izrađen na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu (Babić, Lj. i sar, 2004). Ručno oprane i polovljene kajsije su odmah potapane u pripremljen rastvor prema planu eksperimenta (tab. 2). Svakih 15 minuta su uzimani uzorci iz osmotske sušare za merenje vlažnosti polutki. Ova procedura ja rađena na početku, tokom i na kraju svake eksperimentalne jedinice. Filter papir je korišćen za brzu drenažu uzorka pre no što je pripremljen uzorak za merenje vlažnosti.

Tabela 2. Plan eksperimenta
Table 2. The plan of tests

Sorta Variety	Sumporisanje Sulphuring	Osmotsko sušenje Osmotic drying				Konvektivno sušenje Convective drying
		t = 45 ^{0}C c = 0,7	t = 45^{0}C c = 0,85	t = 55^{0}C c = 0,7	t = 55^{0}C c = 0,85	
Ananaskij	1a	1	1b	1c	1d	1,1a, 1b, 1c, 1d
Ambrozija	6	2	4	3	5	2,3,4,5,6
Novosadska rodna	8	10,13	7,12	11	9	7,8,9,10,11,12, 13
Kečkemetska ruža	16	15	17	14	18	14,15,16,17,18

Određeni broj uzoraka polutki kajsije je sušen samo konvektivno sa sumporisanjem kao načinom pripreme, te će promena vlažnosti polutki kajsija koja je praćena preko promene mase služiti kao referalni postupak. Tri grama sumpora (Taylor, 1995) su sagorevana po jednom kilogramu svežih polutki kajsije. Dužina ekspozicije je bila četiri sata. Temperatura vazduha za sušenje u konvektivnoj sušari je imala istu vrednost za sve eksperimentalne jedinice. Predhodno odmerena masa uzorka sa poznatom vlažnošću je ulagana na lese sušare u elementarnom sloju. Cela sušara je postavljena na vagu, te je praćena promena mase svakih 15 minuta tokom eksperimenta. Kraj konvektivnog sušenja je izračunat na osnovu informacija o početnoj vlažnosti polutki i masi.

Merenjem trenutnih vlažnosti uzoraka polutki kajsija koji su uzimani svakih 15 minuta tokom osmotskog sušenja došlo se do podataka koji su prezentovani tabelarno i grafički.

REZULTATI I DISKUSIJA

Delimični rezultati konvektivnog sušenja pod kontrolisanim uslovima su takođe prezentovani.

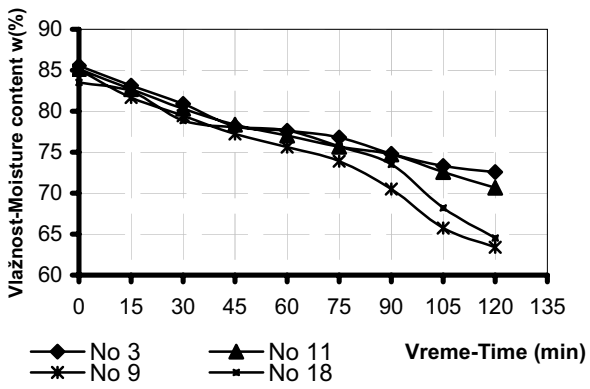
Merenjem trenutnih vlažnosti uzoraka polutki kajsija došlo se do podataka koji su prezentovani tabelarno i grafički. Na slici 10 prikazane su kinetičke krive osmotskog sušenja za četiri eksperimentalne jedinice. Da bi se ustanovio uticaj izbarnih faktora na osmotsko sušenje postavljena je nulta hipoteza: temperatura i koncentracija rastvora utiču na brzinu migracije molekula vode iz polutki kajsija u rastvor. Sledeći korak u obradi podataka merenja je bio ustanovljavanja kvaliteta ove veze. Na osnovu literaturnih podataka (Reppa et al.1998; Raoult-Wack et al. 1998) ispitane se dve moguće jednačine tipa:

1. $y = A\,x^n$ i 2. $y = A\,e^{n\,x}$

to jest odgovarajuće regresione jedančine su:

$\Delta w = w_o - w = A\,\tau^n$ i $\Delta w = w_o - w = A\,e^{n\,\tau}$

gde je: w_o–početna vlažnost uzorka (%), w-trenutna vrednost vlažnosti uzoraka (%), τ-vreme (min).



Sl. 10. Osmotske kinetičke krive sušenja pri koncentraciji rastvora od 0,70 (No 3 i No 11) i koncentraciji od 0,85 (No 9 i No 18) pri temperaturi rastvora od 55°C
Fig 10. Osmotic drying curves for solution concentrations of 0,70 (No 3 and No 11) and 0,85 (No 9 and No 18) and solution temperature of 55°C

Nulta hipteza je urađena pracijalno, prvo je ispitan uticaj koncentracije rastvora (slika 10) na kinetiku osmotskog sušenja pri konstantnoj temperaturi rastvora, a zatim uticaj temperature rastvora pri konstatnoj vrednosti koncentracije rastvora. Tako su na primer u prvoj analizi rezultati sledeći: $F=4,585222>4,170886=F_{crit}$, za F=95%, te je time potvrđena postavljena hipoteza. Slični rezultati su ostvareni i pri drugoj analizi.

Metod regresione analize za oba tipa funkcija je primenjen, obrada podataka je rađena uz pomoć softverskog paketa PC, te se pokazalo da jednačina (1) ima bolji koeficijent korelacije (tabela 3) i to:

Tabela 3. Rezultat regresione analize
Table 3. Regression summary analize

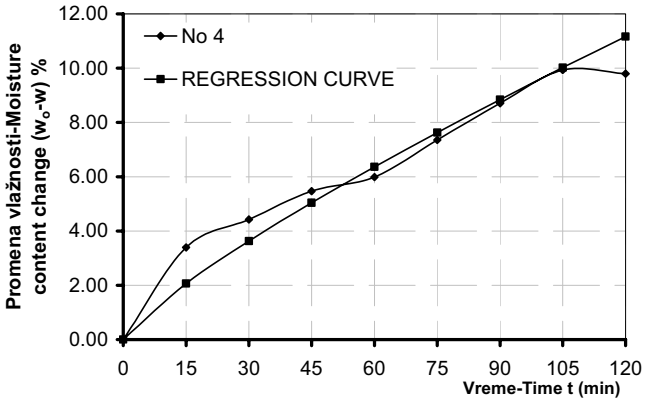
Regression Summary for Dependent Variable: ln dw
$R=0,96726394$ $R^2=0,9355995$
$F(3,50)=3033,3$ $p<0,0000$ Std.Error of estimate:0,21862

	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B
Intercpt			-2,53526	0,311731
$\ln(\tau)$	0,996397	0,0104543	0,81154	0,008515
$\ln(t/t_0)$	0,045677	0,0120716	1,374136	0,363157
$\ln(c/c_0)$	0,010035	0,0120716	0,312012	0,375342

Izračunati parametri funkcije su: $A=e^{-2,53526}=0,079241$; $n_1=0,81154$; $n_2=1,374136$; $n_3=0,312012$; koeficijent korelacije:R=0,96726394, standardna greška računanja: Std Error=0,218. Time se došlo do empirijskog izrada:

$$w = w_o - \left[0,0792 \ \tau^{0,8115} \left(\frac{t}{t_o} \right)^{1,3741} \left(\frac{c}{c_o} \right)^{0,3120} \right] \quad (\%)$$

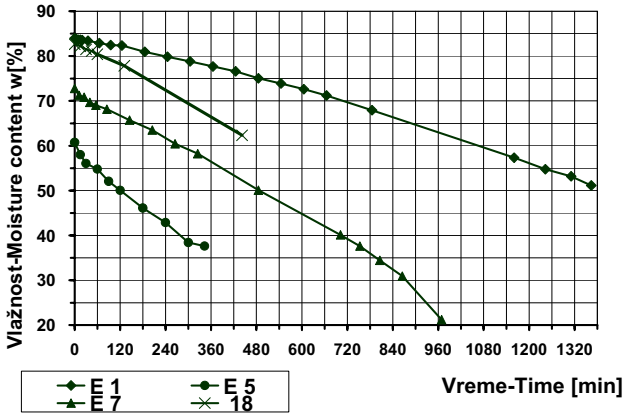
koji opisuje promenu vlažnosti polutki kajsija tokom osmotskog sušenja i koja važi za: temperaturu rastvora t=45-55°C i koncentraciju rastvora c=0,70-0,85 od maksimalne koncentracije za dati nivo temperature rastvora šećera i vode. Provera empirijskog izraza je urađena za uslove eksperimenta 4(t=45°C, c=85%) i prikazana je na slici 11.



Sl. 11. Empirijska regresiona kriva i izmerene vrednosti pri eksperimentu No 4
Fig 11. Empirical regression curve and measured values for test No 4

Na osnovu prikaza sa slike 11 može se konstatovati da dobijena empirijska jednačina dobro pokriva eksperimentalnu krivu u drugom satu osmoze, dok u periodu od prvih 45 minuta predstavlja podcenjene vrednosti.

Delimični rezultati samo konvektivnog sušenja i sušenja na multi sušarama su dati na slici 12.



Sl. 12. Kriva osmotske dehidracije (18) i konvektivne kinetičke krive uzoraka sa predhodnom pripremom: E1-tretiranje kiselinom, E5,E7-sumporisanje i osmotsko sušenje
Fig 12. Osmotic dehydration (18) and convective kinetic drying curves of samples with pretreatment: E1-acidification; E5, E7-sulphuring and osmotic dehydration

Izmerene vrednosti mase uzoraka u konvektinoj sušari su poslužile za izračunavanje trenutnih vrednosti vlažnosti. Na taj način se došlo do kinetičkih krivih sušenja. Kriva E1 je kinetička kriva uzorka koji je pre konvektivnog sušenja pripremljen tako što je potapan u rastvor limunske kiseline, E5 i E7 su uzorci koji su sumporisani, a nakon toga osmotski sušeni. Kriva No 18 predstavlja promenu vlažnosti uzorka tokom osmotskog sušenja. Temperatura vazduha za konvektivno sušenje je održavana na konstantnom nivou od 50°C (E1 i E7) i od 60oC (E5), a brzina kretanja vazduha je bila konstantna tokom svih eksperimenata. I ovde je očigledno da temperatura vazduha u konvektivnoj sušari ima uticaja na brzinu otpuštanja vlage iz uzorka (E5 i E7), ali je ovaj faktor limitiran kvalitetom finalnog bio proizvoda.

ZAKLJUČAK

Intenzivna istraživanja primene drugih vidova energije za sušenje bio materijala ili njihovih kombinacija rade se u svetu. Sa skromnom finasijskom potporom Ministarstva nauke i zaštite životne sredine, ovakva istraživanja rade se i u Srbiji. Deo tih rezultata prezentovan je pri sušenju polutki više sorti kajsija, a

slična istraživanja sprovedena su i sa drugim voćem: breskvom, jabukom, kruškom, dunjom, grožđem i šljivom. Rezultati pokazuju da je domaća kombinovana tehnologija sušenja opravdala očekivanja u pogledu sniženja potrošnje toplotne energije i očuvanja kvaliteta proizvoda.

NAPOMENA: Rezultati istraživačkog rada su nastali zahvaljujući finansiranju Ministarstva nauke i zaštite životne sredine, Republike Srbije projekta evidencionog broja BTN-341002B pod nazivom "PROIZVODI OD SUŠENOG VOĆA" u okviru Nacionalnog programa „Biotehnologija i agroindustrija", od 1.04.2005.

LITERATURA

[1] Babić Ljiljana, Babić M, Karadžić B: Sušenje kajsije, Časopis PTEP, Vol 6(2002)1-2:1-4.
[2] Babić Ljiljana, Babić M, Pavkov, I: Kombinovano osmotsko i konvektivno sušenje kajsije, Časopis PTEP, Vol 7(2003)1-2:1-3.
[3] Babić Ljiljana, Babić M, Pavkov, I: Osmotsko sušenje kajsije u zavisnosti od temperature I koncentracije rastvora, , Časopis PTEP, Vol 8(2004)1-2:1-3.
[4] Babić Ljiljana, Babić M, Pavkov, I: Apricot Drying, Contemporary Agriculture, Vol LIV(2005)1-2:401-406.
[5] Belik L: Drying of granular materials by fluidization, Chemie-Ing-Technik 23(4):253-257, 1960
[6] 6. Borisov Y, Gynkina N.M: On acoustic drying in a standing sound wave, Soviet Physics-Acoustics 8(1) pp 129-131, 1962.
[7] Borisov Y, Statnikov Y.G: Flow steam generated in an aoustic standing waves, Akustic Journal 11(1), pp 3-38, 1965.
[8] 8. Borisov Y, Gynkina N.M: Experiments on sound drying, Ultrazvukovaiya Tehnika 5(3), pp 38, 1967.
[9] Borisov, Y, Gynkina M: Acoustic drying, In Rosenberg LD, Physical principles of ultrasound technology, Vol.2, New York: Plenum Press, pp 381-473, 1973.
[10] Borisov, Y, Ginin, N: An acoustic drum dryer, Russian patent No 184, p. 651, 1967.
[11] Buhler-Miag GmbH: Prospektni materijal, 2005.
[12] Gawrzynski Z, Glaser R: Drying in a pulsed-fluid bed with relocation gas steam, Drying technology – Special issue on Progress of Drying Technologies, 14(5):1121-1172, 1996.
[13] Durance T, Wang L: Canadian Institute f Food Science and Technology Annual Conference, Kelowna, Canada, 1999.
[14] Howard G, Guile R: Profiting from innovation, New York, Free Press, 1992.
[15] Kudra T, Mujumdar A: Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker, Inc, New York, p. 459, 2002.
[16] Ogura H, Nagura A, Matsuda H, Hasatani M, Yanadori M, Hiromatsu M: Studies on heat transfer augmentation in chemical heat pump composed of $CaO/Ca(OH)_2$ reversibile reaction and evaporation/condensation of water, Proc. International Conference "Analysis of Thermal and Energy Systems", Greece, pp 665-676, 1991.
[17] Ogura H, Mujumdar AS: Proposal for a novel chemical heat pump Dryer, Drying Technology 18(4,5):1033-10053, 2000.
[18] Oxford University Press: The illustrated dictionaly, Mladinska knjiga, p. 1007, 2002.
[19] Strommen I, Jonassen O: Performance tests of a new 2-stage counter-current heat pump fluidized bed dryer, Proc. 10th International Drying Simposium (IDS'96), Poland, pp 553-568, 1996.
[20] Taylor Sandra: Drying Foods in Costal Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 31, 1995.

Primljeno: 4.03.2006. Prihvaćeno: 5.03.2006.