

ISPITIVANJE MERODAVNIH PARAMETARA PROCESA SUŠENJA PRIMENOM SUNČEVE ENERGIJE

*Todorović M. S., Kosi F., Simić. Lj., Koldžić, G.**

Ključne reči: *konvektivno sušenje, hibridni sunčani sistemi, ispitivanje merodavnih osobina materijala i procesa, prenos toplote i materije, matematičko modeliranje*

SAŽETAK:

U radu je dat pregled stanja razvoja sunčanih i sunčanih hibridnih sistema za konvektivno sušenje poljoprivrednih i drugih proizvoda. Obuhvaćene su tehnologije korišćenja ravnih prijemnika i prijemnika energije koncentrisanog sunčevog zračenja. Analizirane su pojave prenosa toplote i materije i odgovarajuće osobine materijala merodavne za kontrolu i optimizaciju procesa i sistema. Dati su pregled i kritika stanja razvoja odgovarajućih fizičkih i matematičkih modela. U zaključku rada su dati rezultati istaživanja dinamike odvijanja procesa sušenja karakterističnih modela sistema, određeni numeričkim simulacijama, parametarskim analizama i eksperimentalnim putem.

1. UVOD

Termičko sušenje se, prema mehanizmu kojim se potrebna energija za udaljavanje vlage iz unutrašnjosti materijala, odnosno sušenje, dovodi materijalu deli na: konvektivno, zračenjem, provođenjem i kontaktom. U sva tri slučaja vlaga se predaje radnom fluidu sušenja - vazduhu. Na današnjem nivou razvoja tehnologija korišćenja sunčeve energije može se reći da se istom može izvršiti supstitucija bilo kog izvora toplote, bilo kog klasičnog sistema za termičko sušenje i to na bilo kom nivou temperatura radnog fluida odnosno toplotnog izvora. Ipak, najčešće, za sušenje poljoprivrednih materijala, sunčeva se energija uvodi u sisteme konvektivnog sušenja ([6],[7]).

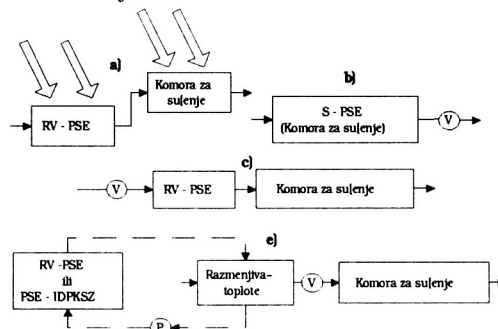
* Prof. dr Marija Todorović, dipl.maš.ing.,

Prof. dr Kosi Franc, dipl.maš.ing.,

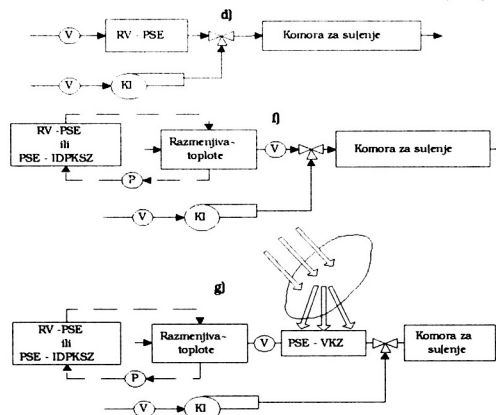
Simić Ljiljana, dipl.maš.ing, Koldžić Goran, dipl.maš.ing, Odeljenje za energetske efikasnost, Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Beogradu, Nemanjina 6, 11080 Zemun

2. SISTEMI KORIŠĆENJA SUNČEVE ENERGIJE ZA KONVEKTIVNO SUŠENJE

Karakteristične vrste konvektivnih sistema za sušenje korišćenjem sunčeve energije, date na slikama 1. i 2. prema [6], obuhvataju: *a* - sistem sa ravnim vazдушnim prijemnikom sunčeve energije, RV - PSE-om i prirodnim strujanjem vazduha, *b* - sušara S - PSE (komora za sušenje je jednovremeno PSE) sa ventilatorom za prinudno strujanje vazduha, *c* - sistem sa komorom za sušenje, poljem ravnih vazдушnih RV - PSE-a i ventilatorom, *d* - hibridni sistem koji se sastoji od sistema *c* sa dodatnim, klasičnim izvorom energije (gorionik za klasično gorivo), *e* - sistem sa komorom za sušenje, poljem ravnih PSE-a sa tečnim fluidom ili paraboličnim koncentratom PSE-a, odnosno integrisanih dvostruko-paraboličnih prijemnika koncentrisanog zračenja (IDPKSZ) sa cirkulacijom tečnog radnog fluida pumpom, razmenjivačem toplote (tečnost/vazduh) i ventilatorom, sistem *f* - hibridni sistem varijanti sistema *e* dopunjenih gorionikom za klasična goriva, i hibridni sistem *g* za visoko-temperaturno sušenje.



Slika 1. Šeme sistema za konvektivno sunčano sušenje (tipovi a, b, c i e)



Slika 2. Hibridni sistemi (tipovi e, f i g)

Sistem *g* koji uz komoru za sušenje sa fluidizovanim slojem ima i komoru za sagorevanje goriva (gasovito ili tečno), poseduje dva sunčana podsistema: primarni cirkulacioni krug polja PSE-a sa tečnim prenosnim fluidom i razmenjivačem toplote (prenosni fluid/vazduh) i drugi sa poljem heliostata koji koncentrišu sunčevo zračenje i usmeravaju ga na transparentnu prekrivku visokotemperaturne komore za zagrevanje vazduha za sušenje.

Pored konvektivnog dovoda toplote za sušenje, kod sistema *a* i *b* su prisutni i mehanizmi prenosa energije zračenjem, provođenjem i kontaktom. Sistem *a* je poluaktivan (termosifonska sušara), a *b* je aktivna sušare sa prinudnim strujanjem vazduha. Vlažan materijal se kod oba sistema izlaže neposredno dejstvu sunčevog zračenja. Pritom, obično deo zračenja dospeva i na podlogu na kojoj se materijal nalazi. U podlozi se deo upadnog zračenja apsorbuje i pretvara u toplotu što donosi povećanje temperature podloge, nekada i do više temperature od temperature materijala. U tom slučaju se toplota provodi kroz podlogu i prenosi kontaktom na vlažan materijal koji se suši.

3. FIZIČKI I MATEMATIČKI OPIS MERODAVNIH POJAVA I PROCESA

Temperaturi, relativnoj vlažnosti i brzini strujanja vazduha, osnovnim uticajnim veličinama konvektivnog sušenja, za opisivanje čisto sunčanog i hibridnog sistema sušenja, treba dodati intenzitet sunčevog zračenja i uticaj istog na termofizičke osobine materijala koji se suši. Promena stanja vlažnog vazduha u vazдушnom PSE-u je određena bilansom materije i toplote. Toplotni bilans PSE-a sa tečnim prenosnim fluidom - ravnog PSE-a ili PSE-a sa koncentracijom zračenja, kao što su parabolični ili integrisani dvostruki parabolični prijemnik koncentrisanog sunčevog zračenja (IDPKSZ), može se napisati u sledećem obliku:

$$GZ \cdot \eta \cdot A_C = \sum (m_C \cdot c_C)_i \cdot \frac{dT_C}{dt} + \dot{m}_{RF} \cdot c_{RF} \cdot (T_{RFi} - T_{RFu}). \quad (1)$$

U ovoj jednačini trenutna termička efikasnost η je određena funkcionalnom zavisnošću (2) od temperature radnog fluida, temperature okolne sredine i intenziteta sunčevog zračenja za IDPKSZ, odnosno zavisnošću (3) za ravne PSE.

$$\eta = \eta_0 - \frac{U \cdot (\bar{T}_{RF} - T_O)}{GZ} - \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (\bar{T}_{RF}^4 - T_O^4)}{C \cdot GZ}, \quad (2)$$

$$\eta = \eta_0 - \frac{U \cdot (\bar{T}_{RF} - T_O)}{GZ} - \frac{b \cdot (\bar{T}_{RF} - T_O)^2}{GZ}. \quad (3)$$

U sistemima sa PSE-ima sa tečnim prenosnim fluidom se zagrevanje vazduha vrši u razmenjivaču toplote. U uslovima dovoljno malih gubitaka toplote razmenjivača, da se mogu zanemariti, jednačina toplotnog bilansa se može dati u sledećem obliku:

$$\dot{m}_{RF} \cdot C_{RF} \cdot (T_{RFu} - T_{RFi}) = \dot{m}_V \cdot \Delta h_V + C_{RT} \cdot \frac{dT_{RT}}{dt} \quad (4)$$

Trenutna termička efikasnost ravnih vazдушnih PSE-a, kao i PSE-a od elastičnih plastičnih PSE-a od PVH, PE ili nekog drugog sličnog materijala se takođe određuje jednačinom sličnog oblika kao (3) prema ([4] - [6]) ili u linearizovanom obliku.

Odvijanje procesa sušenja određuje simultanost i međudejstvo pojava prenosa toplote i materije u vlažnom materijalu i na njegovim graničnim površinama izloženim dejstvu sunčevog zračenja, a koje se nalaze u dodiru sa radnim fluidom vazduhom i podlogom [2]. Početak sušenja zavisi od uspostavljanja neravnotežnih stanja vlažnog vazduha za određena stanja vlažnog materijala, pri čemu ta neravnotežna stanja nisu reverzibilna niti jednoznačno određena već zavise od smera procesa - sorpcija ili desorpcija ([2], [3]). Uz sve specifičnosti i teškoće određivanja krivih kinetike sušenja generalno, kod sunčanog sušenja, kod koga je intenzitet energetskeg izvora nestalan, potrebno je određivanje dinamike procesa sušenja izvršiti ispitivanjem: kinetike sušenja za niz simulacija različitih scenarija kontrole režima rada PSE-a i celog sistema a za uslove karakterističnih meteoroloških perioda rada sistema. Pored toga potrebno je ispitivanje i uticaja sunčevog zračenja na krive sorpcije i desorpcije, kao i na termofizičke osobine i koeficijente prenosa toplote i materije vlažnih materijala.

Proizvodi sušeni uz neposredno izlaganje dejstvu zračenja i to posebno u sistemima sa termosifonskim strujanjem (relativno male količina vazduha malih brzina), pokazuju veoma dobro očuvanu strukturu poroznog skeleta materijala uz zanemarivo smanjenje zapremine [1], za razliku od smežurane, deformisane strukture materijala klasično - konvektivno sušenog materijala. Smanjena promenjnost strukture materijala nesumnjivo će se odraziti na osobine materijala koje karakterišu odvijanje mehanizama kretanja vlage kroz materijal.

Stanje vlažnog vazduha u neposrednoj blizini površine vlažnog materijala je ravnotežno stanje u kome je parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu jednak pritisku zasićene vodene pare temperature površine materijala. U slučaju da vazдушna struja postigne takvo stanje iznad površine vlažnog materijala, gradijent pritiska pare, odnosno potencijal sušenja iščezava i proces sušenja se zaustavlja. Kod klasičnog konvektivnog sušenja uz stalnu raspoloživost energetskeg izvora nije teško održavati potencijal sušenja vazduha dovoljno visokim. Kod sunčanog sušenja bez dodatnog izvora energije i skladištenja energije slična kontrola nije moguća. Varijacije promene intenziteta sunčevog zračenja i temperature kao i vlažnosti vazduha, pomeraju stanje vazduha ponekad čak u oblast negativnih potencijala koji izazivaju suprotan proces - proces vlaženja, kako se to nekada dešava kod termosifonskog sušenja tokom perioda prekida zračenja, posebno noću ([1],[6],[7]).

Za ujednačen raspored vlage u vlažnom materijalu određenog sadržaja vlage, zavisnost ravnotežne relativne vlažnosti vazduha od ravnotežnog sadržaja vlage materijala za određenu temperaturu (krive sorpcije i krive desorpcije) se za niz

poljoprivrednih materijala daje u obliku Hendersonove empirijske zavisnosti prema ([2],[4],[6]), a određuju se eksperimentalno.

Može se pretpostaviti da fototermalno dejstvo snopa fotona ima poseban efekat na vlažne materijale izložene neposredno dejstvu sunčevog zračenja i da baš zahvaljujući istom dolazi do boljeg očuvanja porozne strukture sunčano sušenih materijala. Kako se njegovo primarno dejstvo odnosi baš na spoljašnju graničnu površinu materijala, to se mogu naslućivati efekti istog i na simultane procese razmene materije i toplote i na samoj površini materijala. Odgovor treba tražiti prevashodno merenjem, mada se može razmišljati i o pokušaju uspostavljanja fizičkog modela uprošćenog sistema.

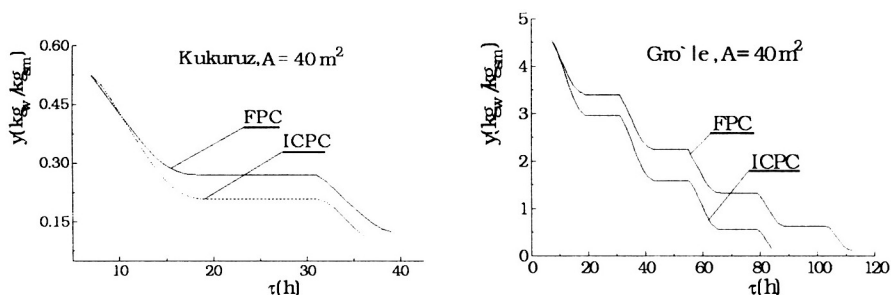
Posmatrajući različite protoke u vlažnom materijalu kao kapilarno-poroznom, četvorokomponentnom heterogenom sistemu, čvrste, tečne, parne i gasne faze, primenom osnovnih jednačina o održanju materije, energije i kr-tanja matematički opis ponašanja vlažnog materijala pri sušenju se može dati u obliku jednačina polja sadržaja vlage, temperature i totalnog pritiska prema ([2],[3],[6],[7]). Pritom, u merodavnom sistemu jednačina pojavljuje se matrica koeficijenata, čiji elementi zavise od termofizičkih i osobina prenosa materije i toplote vlažnog materijala. Nesumnjivo je da će i za određivanje ovih koeficijenata za procese sušenja, uz neposredno izlaganje materijala dejstvu sunčevog zračenja, biti potrebna posebna evaluacija merodavnih podataka i eventualno njihovo posebno merenje.

Polazeći od izraza za maseni protok vlage, koja se razmenjuje na graničnoj površini dodira, vlažan materijal - vazduh, kao i materijalni bilans vlage, uz jednačinu za brzinu sušenja isparavanja, dobija se izraz za apsolutnu vlažnost vazduha na izlazu iz komore za sušenje [7]. Toplotni bilans vazduha za sušenje u komori može se dati u obliku zavisnosti od specifičnog toplotnog protoka konvekcijom na graničnoj površini dodira različitih faza a uvodenjem izraza za specifičnu entalpiju vlažnog vazduha i specifičnu entalpiju vlage u parnom stanju (vodene pare) dobija se izraz za temperaturu vazduha na izlazu iz sušare. Najzad, materijalnim bilansom vlage u vlažnom materijalu i toplotnim bilansom vlažnog materijala: uz određivanje apsolutne vlažnosti na površini materijala, poznavajući koeficijent provođenja vlage materijala, dolazi se do apsolutne vlažnosti na površini materijala. Dodatkom početnih uslova proces sušenja vlažnog materijala je potpuno određen ([6],[7]).

4. ANALIZA REZULTATA

Dati fizički i matematički modeli su uspešno primenjeni za dinamičke simulacije procesa sušenja korišćenjem sunčeve energije u radovima ([6] i [7]). Na sl. 3 su date krive promene sadržaja vlage nekih vlažnih materijala tokom procesa sušenja korišćenjem sunčeve energije sistemima označenim sa c i e na sl. 1. Pokazalo se da se simulacijama procesa sušenja, koje su sprovedene za hidrometeorološke uslove meseca jula u Beogradu, mogu ispitivati osobine sistema i njihova dinamika rada pri sušenju različitih materijala.

Numeričke simulacije omogućuju upoređenje efekata rada različitih sistema. Tako primena PSE-a sa koncentracijom sunčevog zračenja ima značajnu prednost u odnosu na ravne PSE u pogledu specifične i ukupne potrošnje energije. Pored toga primenom PSE-a sa koncentracijom zračenja, lakše se dostižu više temperature vazduha za sušenje i duže se održavaju na višem nivou. To olakšava kontrolu procesa i veoma značajno skraćuje vreme trajanja procesa sušenja, doprinoseći tako i povećanju kvaliteta proizvoda.



Slika 3: Krive promene sadržaja vlage nekih vlažnih materijala tokom procesa sušenja korišćenjem sunčeve energije sistemima označenim sa c i e

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu datog pregleda pojava prenosa materije i toplote karakterističnih za procese i sisteme sušenja poljoprivrednih materijala sunčevom energijom, kao i analize metoda njihovog matematičkog opisa, može se zaključiti da razvijeni modeli omogućuju upoređenje sistema, režima rada i odgovarajućeg uticaja na relativne brzine sušenja, kao i specifične i ukupne potrošnje energije. To dozvoljava prilaz optimizaciji sistema i procesa ali ne i zatvaranje procesa optimizacije. Stoga, dalja ispitivanja numeričkim simulacijama treba nastaviti u sprezi sa teorijskim istraživanjima i ispitivanjima merenjem merodavnih osobina i ponašanja vlažnih materijala pri sunčanom sušenju, kao i osobina i dinamičkog ponašanja sunčanog dela sistema, kako bi se razvili modeli takve kvantitativne tačnosti kakvu traži industrijska proizvodnost, pouzdanost, kvalitet i ekonomičnost.

LITERATURA

- [1] M.Todorović, F.Kosi, G.Niketić: "Research Basis for Developing the Solar Drying in Yugoslavia", *FAO/UNESCO Solar Drying Working Group Meeting, Proceedings*, Perpignan, 1984, pp. 48-52.
- [2] M.Todorović: "Review and Comparison of Various Formulations of Heat and Mass Transfer in Porous Media", *Introductory Lecture on Heat Transfer and Ther-*

- mophysics ASME/AIAA Conference, Boston, 1986.*
- [3] A.V.Luikov: "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies", *Int. J. Heat Mass Trans.*, vol.18, no.1-A, Pergamon Press, 1975, pp. 1-14.
 - [4] B.Palancz: "Analysis of Solar-Dehumidification Drying", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.27, no.5, Pergamon Press, 1984. pp.647-655.
 - [5] M.Džodžo, F.Kosi, M.Todorović: "Ispitivanje vazdušnih prijemnika sunčeve energije od plastičnih folija", *Klimatizacija grejanje i hlađenje*, broj 3, Beograd, 1980, pp.25-34.
 - [6] M.Todorović, G.Koldžić, F.Kosi: "Thermodynamic Investigation of Concentrated Solar Radiation Technology for Drying Processes", *Agricultural Engineering*, vol.2, no.3-4, Novi Sad, 1996, pp.53-63.
 - [7] M.S.Todorović, F.Kosi, G.Koldžić: "Fizički fenomeni i matematičko modeliranje procesa sušenja korišćenjem sunčeve energije" *Naučno stručni skup PTEP 97*, Tara 1997, pp.7-13.

INVESTIGATION OF PARAMETERS RELEVANT FOR SOLAR DRYING

ABSTRACT:

A review of the state of the art of different types of pure solar and hybrid convective drying systems for agricultural and other products is presented. Characteristics of drying processes and heat and mass transfer phenomena relevant for pure and hybrid solar systems with flat plate and concentrating solar collectors have been analysed. Also, problems and recent advances in relevant physical and mathematical modelling have been reviewed. Finally results of investigation of process dynamics - characteristic for different system's models, obtained through the numerical simulations, parametric analysis and measurements have been given.