SUŠENJE

PODLISTAK „PROCESNE TEHNIKE“
Broj 9. Decembar 2001. Godina 4.

Podlistak uredio
prof. dr Radivoje M. Topić, dipl. inž.

PREGLEDNI RAD • SUBJECT REVIEW UDK 542.47+621.57 BIBLID 0352–678X (2001) 17:4 p. 49–52

UTICAJ BRZINE SUŠENJA I USLOVA OKOLINE NA NAČIN RADA SUŠARE SA TOPLOTNOM PUMPOM

S. Prasertsan, P. Saen-Saby,
G. Prateepchaikul i P. Ngamstritrakul,
Department of Mechanical Engineering
Prince of Songkla University, Hat Yai, Tajland

Sušara sa toplotnom pumpom – sistem za sušenje toplotnom pumpom – sa energetskog aspekta je efikasno rešenje. U osnovnom sistemu za sušenje toplotnom pumpom, vazduh, agens sušenja, postupno prelazi preko kondenzatora, kroz komoru za sušenje i preko isparivača. Povraćaj energije se vrši preko isparivača i kondenzatora. Prenos toplote i materije u isparivaču, kondenzatoru i komori za sušenje je međuzavistan. Sistem za sušenje toplotnom pumpom može da radi kao otvoren ili delimično zatvoren sistem. Pošto se sveži vazduh dovodi u radni proces, parametri okoline su drugi važan faktor koji utiče na rad sistema sa toplotnom pumpom. Ispitivanja vezana za rad sistema sa toplotnom pumpom izvršena su simulacijom na računaru, sa aspekta maksimalne vrednosti specifičnog izdvajanja vlage i maksimalne brzine sušenja. Došlo se do rezultata da u početku procesa sušenja, pri velikim brzinama sušenja, sistem sa toplotnom pumpom treba da radi kao otvoren, a pri kraju procesa sušenja, kao delimično otvoren (sa delimičnom recirkulacijom). Stepen recirkulacije, zatvorenosti sistema zavisi od parametara okoline.

Ključne reči: *toplotna pumpa; sušara; način rada; brzina sušenja*

EFFECTS OF PRODUCT DRYING RATE AND AMBIENT CONDITION ON THE OPERATING MODES OF HEAT PUMP DRYER

Heat pump dryer (HPD) is an energy-efficient drying equipment. In typical HPD arrangement, the working air flows through a series of condenser, dryer and evaporator. Energy is recovered by a pair of the evaporator and condenser. The heat and mass transfers at the evaporator, condenser and dryer are interdependent. That HPD can be operated as an open cycle mode or partially closed cycle mode. As the ambient air is drawn into the working air circuit, the ambient condition becomes another important factor that influences the operating modes of the HPD. The operating modes for maximum specific moisture extraction rate and maximum moisture extraction rate are studied by computer simulation. It was found that in the high drying rate stage, the systems should be an open cycle. During the final stage of product drying the system should be partially closed. The degree of closing depends on the ambient condition.

Key words: *heat pump; dryer; operating mode; moisture extraction rate; ambient effects*

Uvod

Sa energetskog aspekta, zbog povraćaja energije toplotna pumpa predstavlja dobro rešenje za sušenje. Izrađeni agens sušenja se ne dovodi van komore za sušenje, nego se ponovo vodi (recirkuliše) preko isparivača i kondenzatora u komoru za sušenje, tako da dolazi do povraćaja energije. Temperatura i vlažnost agensa sušenja imaju veliki uticaj na brzinu sušenja i uštedu energije, što se karakteriše vrednostima specifičnog izdvajanja vlage i intenziteta sušenja. U toku rada, kada brzina sušenja stalno opada, stepen uštede energije sistema sa toplotnom pumpom i koeficijent grejanja variraju u zavisnosti od režima izrađenog agensa sušenja (vrednosti temperature i relativne vlažnosti), koji ulazi u isparivač.

Stepen uštede energije sistema za sušenje sa toplotnom pumpom povratno utiče na režim agensa sušenja, a to znači i na brzinu sušenja. Prema tome, rad toplotne pumpe, parametri agensa sušenja i brzina sušenja su međuzavisni. Sem toga, često se sveži vazduh dovodi u proces da bi se stabilizovao rad sistema, što znači da je to još jedan od parametara koji utiču na rad toplotne pumpe. Ostvarivanje optimalnog režima rada toplotne pumpe je dinamički složen proces. U ovom radu se pomoću kompjuterske simulacije definiše optimalni režim rada toplotne pumpe.

Konfiguracija sušare – sistem za sušenje sa toplotnom pumpom

Sistemi razmatrani u ovom radu prikazani su na slici 1 (a i b). Karakteristika je da se agens sušenja posle prolaska preko kondenzatora dogreva, čime se smanjuje relativna vlažnost i povećava potencijal sušenja.

U sistemu na slici 1 (a), jedan deo izrađenog agensa sušenja recirkuliše, a ostatak se ispušta u okolinu. Svež vazduh se dovodi iz okoline u cilju nadoknađivanja dela izrađenog agensa sušenja koji je ispušten u okolinu. Stepen recirkulacije, definisan kao odnos mase recirkulisanog i ukupne mase agensa sušenja, utiče na režim agensa sušenja, a to znači i na stepen povraćaja i uštede energije. Dakle, specifično izdvajanje vlage i brzina sušenja zavise od stepena recirkulacije.

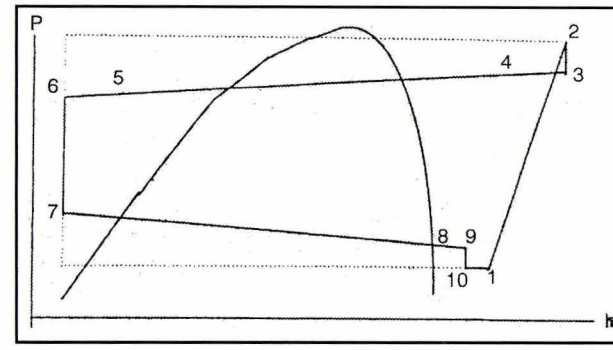
U sistemu na slici 1b, veća vrednost osetljive toplotne energije se vraća u proces možda i bez kondenzacije. Agens sušenja napušta isparivač na niskoj temperaturi i sa znatnom količinom vlage, koja je nepoželjna u procesu, čini otvoreni proces. Povećanje vrednosti specifičnog izdvajanja vlage i brzine sušenja zavisi od parametara procesa sušenja i parametara okoline.

Teorijska istraživanja

Teorijska istraživanja su sprovedena kompjuterskom simulacijom. Jednačine prenosa toplote za radna tela koja učestvuju u procesu i za elemente sistema ne nalaze se u radu. Modeli isparivača i kondenzatora su definisani metodom Kaysa i Londona (1964). Promena faze rashladnog fluida u isparivaču i kondenzatoru određena je metodom konačnih razlika.

Na vazdušnoj strani isparivača postoje dve oblasti – suva oblast, gde se odvija samo prenos toplote, i vlažna oblast, gde se odvijaju spregnuti procesi prenosa toplote i materije. Granica ovih oblasti određena je tačkom rose mešavine pare i vazduha. Model kompresora je definisan na osnovu pretpostavljenog Threlkedovog politropskog procesa. Termodinamičke i termofizičke osobine freona R22 i agensa sušenja, vazduha, uzete su iz ASHRAE (1981). Model sušare je generalizovan uvođenjem pojma efikasnost sušare koji se definiše promenom apsolutne vlažnosti agensa sušenja pri prolazu kroz komoru za sušenje (Δy). Ovaj pojam indirektno predstavlja brzinu sušenja proizvoda. Simulacija radnih tela (agens sušenja i R22) izvršena je metodom iteracije i koja se završava kada se postigne ravnoteža energije između dva kružna toka unutar dozvoljene tolerancije. Parametri svežeg, ulaznog, vazduha prethodno su pretpostavljeni. Korišćenjem modela sušare dobijeni su parametri agensa sušenja na izlazu. Model isparivača definiše parametre agensa sušenja na izlazu iz isparivača. U delimično zatvorenom sistemu stanje agensa sušenja na ulazu u kondenzator definisano je pretpostavljanjem adijabatskog mešanja svežeg vazduha i recirkulisanog agensa sušenja. Simulacija agensa sušenja je završena korišćenjem modela za upoređivanje prethodno pretpostavljenih parametara.

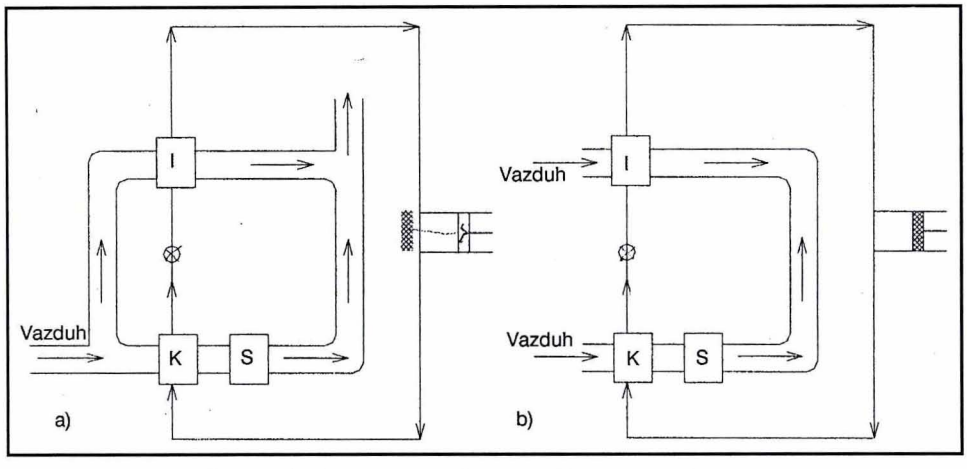
Simulacija toka rashladnog fluida predstavlja *p–h* dijagram (slika 2), koji uključuje pad pritiska ventila kompresora (Threlkeld), u kondenzatoru i spojnom vodu.



Slika 2. P-h dijagram rashladnog sredstva

Stanja od 1 do 10 na dijagramu su numerički red simulacionog procesa koji je uzeo u obzir prenos toplote i materije, promenu faze, pad pritiska, parametre agensa sušenja i rashladnog tela. Koeficijenti prenosa toplote su uzeti iz literature (Rich, Perry i Chilen i Travist). Simulacija se sastojala od dve ponovljene (iterativne) petlje, unutrašnje i spoljašnje, posebno za rashladno telo i za agens sušenja.

Tehnički podaci komponenti toplotne pumpe su: broj obrtaja kompresora 1500 min^{-1}, zapreminski kapacitet kompresora 78,97 $cm^3/(min^{-1})$, promena pritiska 2526,64 kPa, protok agensa sušenja 0,23 kg/s. Kondenzator i isparivač su napravljeni od bakarne cevi unutrašnjeg prečnika od 7,9 mm i debljine zida od 0,8 mm. Rebra su pravougaona, svako površine 215 x 25 mm^2. Broj rebara po 25,4 mm je 17. Ukupne površine za prenos toplote kondenzatora i isparivača su 30,65 m^2 i 21,86 m^2. Debljina filma kondenzovane vlage na isparivaču se pretpostavlja da je 0,0001 m bez zaleđivanja.



Slika 1. Sistem za sušenje sa toplotnom pumpom; a) delimično zatvoren, b) otvoren

Postoje tri nezavisne promenljive: efikasnost sušare e (%), temperatura okoline t_0 (°C) i relativna vlažnost φ (%). Zavisna promenljiva za delimično zatvoren sistem je stepen recirkulacije agensa sušenja η_r, koji je variran u granicama od 0,2 do 0,8 sa korakom od 0,1. Željena

Tabela 1. Rezultati sprovedene kompjuterske simulacije

E	t_0	φ	Režimi sa maksimalnom brzinom sušenja, N			Režimi sa maksimalnim specifičnim izdvajanjem vlage, e_w		
%	°C	%	η_r	$N(z)^*$	$N(o)^*$	η_r	$e_w(z)^*$	$e_w(o)^*$
75	20	50	0,7	8,79	9,32	0,7	3,88	4,07
75	20	70	0,7	8,74	9,03	0,7	3,79	3,90
75	20	90	0,7	8,71	8,83	0,6	3,74	3,77
75	30	50	0,6	8,94	9,40	0,4	3,95	3,99
75	30	70	0,6	8,79	9,00	0,4	3,79	3,82
75	30	90	0,6	8,56	8,58	0,4	3,64	3,68
75	40	50	0,4	8,91	9,22	0,3	3,80	3,98
75	40	70	0,4	8,30	8,39	0,5	3,58	3,74
75	40	90	0,3	7,68	7,79	0,5	3,42	3,65
50	20	50	0,8	5,92	6,26	0,7	2,60	2,72
50	20	70	0,7	5,87	6,09	0,7	2,55	2,62
50	20	90	0,7	5,86	5,89	0,7	2,51	2,51
50	30	50	0,6	6,02	6,96	0,4	2,65	2,70
50	30	70	0,6	5,95	6,02	0,4	2,53	2,56
50	30	90	0,5	5,78	5,75	0,5	2,45	2,47
50	40	50	0,3	6,01	5,16	0,2	2,60	2,78
50	40	70	0,6	5,67	5,64	0,6	2,52	2,60
50	40	90	0,7	5,26	5,19	0,8	2,59	2,48
20	20	50	0,8	2,51	2,60	0,8	1,07	1,10
20	20	70	0,8	2,43	2,51	0,7	1,05	1,06
20	20	90	0,7	2,43	2,41	0,7	1,04	1,02
20	30	50	0,8	2,62	2,61	0,8	1,24	1,10
20	30	70	0,6	2,46	2,46	0,6	1,04	1,06
20	30	90	0,6	2,08	2,35	0,3	0,94	1,02
20	40	50	0,6	2,39	2,40	0,8	1,41	1,29
20	40	70	0,3	2,39	2,31	0,3	1,02	1,27
20	40	90	0,2	2,37	2,12	0,2	1,00	1,19

opcija je maksimalna brzina sušenja N (kg_w/s) i maksimalno specifično izdvajanje vlage e_w [$kg_w/(kWh)$]. Specifično izdvajanje vlage implicira efikasnost iskorišćenja energije u procesu sušenja. U procesu simulacije nezavisno promenljive su varirane u tri vrednosti i to: e (75%; 50%; 20%); t_0 (20°C; 30°C; 40°C) i φ (50%; 70%; 90%).

Rezultati simulacije

Rezultati procesa simulacije za razmatrane sisteme za sušenje sa toplotnom pumpom izloženi su u tabeli 1. Maksimalne vrednosti N i e_w su prikazane boldirano za efikasnost sušare i parametre okoline.

Visoka efikasnost sušare e = 75%

Očigleno je da za visoku efikasnost sušare, koja se javlja u početku procesa sušenja, treba koristiti otvoren sistem. TO se objašnjava činjenicom da kada je efikasnost velika,a gens sušenja koji izlazi iz komore za sušenje relativno je vlažan, pa bi bila i visoka vlažnost na izlazu iz isparivača. Svakako da takav agens sušenja ne odgovara recirkulaciji, pa je ostvarivanje otvorenog sistema bolje. Sem toga, sistem na slici 1b obezbeđuje veću energiju u odnosu na sistem na slici 1a. Specifično izdvajanje vlage je veće u otvorenom sistemu nego u zatvorenom. Pri određenim vrednostima temperatura okoline pokazatelji sistema se smanjuju ako se relativna vlažnost vazduha povećava. Ipak, pri istim relativnim vlažnostima nije uvek slučaj da viša temperatura okoline daje bolje pokazatelje (rezultati od 40°C). Uloga apsolutne vlažnosti postaje značajna i ako pokriva povoljno dejstvo temperature.

Srednja efikasnost e = 50%

Uticaj vlažnosti i temperature je sličan kao i pri visokoj efikasnosti. Na temperaturi od 20°C, otvoren sistem je bolji na svim razmatranim vrednostima relativnih vlažnosti. Ipak, očigledno je da za temperaturu od 30°C i više otvoren sistem ne obezbeđuje optimalne režime. U slučaju porasta temperature i vlažnosti okoline povoljniji je delimično zatvoren sistem (preko 50% recirkulisanog vazduha).

Niska efikasnost sušare e = 20%

Pri kraju procesa sušenja efikasnost sušare je mala i za ove uslove iznosi oko 29%. Agens sušenja na izlazu iz sušare je relativno suv, što čini efikasnijim zatvoren sistem. Pri porastu vrednosti temperature okoline do 30°C, specifično izdvajanje vlage je isto za oba sistema, izuzev za φ = 90%, kada je otvoren sistem i dalje povoljniji u poređenju sa delimično zatvorenim. To je posledica više temperature agensa sušenja u otvorenom sistemu za 8,5°C nego u delimično zatvorenom sistemu, mada je apsolutna vlažnost veća. Međutim, specifično izdvajanje vlage će biti veće osim za slučajeve kada je relativna vlažnost agensa sušenja manja od 70%. Za temperaturu od 40°C, brzina sušenja je veća za delimično zatvoren sistem, što ne važi i za specifično izdvajanje vlage.

Analiza

Generalno maksimalne vrednosti brzine sušenja i specifičnog izdvajanja vlage u delimično zatvorenom sistemu se ne javljaju obavezno pri istom stepenu recirkulacije agensa sušenja. Specifično izdvajanje vlage je odnos brzine sušenja i snage potrebne za rad toplotne pumpe, što je uglavnom snaga kompresora. Snaga kompresora zavisi od dva faktora: odnosa pritisaka i protoka rashladnog tela. Pritisak na ulaznoj strani rashladnog tela je diktiran pritiskom punjenja kompresora. Ako je u isparivač vraćeno više energije (visoko opterećenje isparivača usled visoke temperature i brzine strujanja agensa sušenja), pritisak isparivača će se povisiti zbog toga što će se ekspanzivni ventil više otvoriti. Rezultat toga je mali odnos pritisaka, a to znači i mali specifični rad kompresora. Ipak, jače otvaranje ekspanzionog ventila dozvoljava veći protok. Veći maseni protok zajedno sa malom specifičnom zapreminom (zbog malog pritiska) povećava rad kompresora. Drugim rečima, rad kompresora i povraćaj energije zavise od kvaliteta i kvantiteta agensa sušenja koji ulazi u isparivač. Što se više energije vrati agensom sušenja (u kondenzator), može se dobiti veća brzina sušenja ali na račun većeg rada kompresora. Prema tome, uslovi rada koji daju maksimalnu brzinu sušenja ne garantuju obavezno maksimalnu vrednost specifičnog izdvajanja vlage.

Zaključak

Sistem za sušenje sa toplotnom pumpom je dosta komplikovan zbog interakcije dva radna tela. Karakteristike si-

stema sa toplotnom pumpom su analizirane kompjuterskom simulacijom. Analiziran je uticaj brzine sušenja i parametara okoline na režim rada sistema za sušenje sa toplotnom pumpom.

Izveden je zaključak da na početku procesa sušenja, kada je izrađeni agens sušenja relativno vlažan, treba raditi sa otvorenim sistemom. Ako je brzina sušenja mala (primer pri kraju procesa sušenja), treba koristiti zatvoren sistem. U završnoj fazi procesa sušenja, kada je izrađeni agens sušenja relativno suv, sveži vazduh doveden iz okoline treba kontrolisati (ograničiti). U ovom slučaju preporučuje se delimično zatvoren sistem.

Mora se naglasiti da uslovi koji daju maksimalnu brzinu sušenja ne daju obavezno maksimalnu vrednost specifičnog izdvajanja vlage. Odluka koji će se sistem koristiti zavisi od toga koliko je važna vrednost brzine sušenja i specifičnog izdvajanja vlage.

Literatura

[1] * * *: *ASHRAE Fundamentals,* American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, SAD, 1981.

[2] **Geary, D. F.:** *Return bend pressure drop in refrigeration system,* ASHRAE Trans., Vol. 81, 1975, pp. 250–264.

[3] **Kays, W. M. and A. L. London:** *Compact Heat Exchangers,* McGraw-Hill, New York, 1964.

[4] **Perry, R. H. and C. H. Chilton:** *Chemical Engineers Handbook,* McGraw-Hill, USA, 1973.

[5] **Prasertsa, S., P. Saen-Saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul:** *Heat pump dryer, Part 1: Simulation of the models,* Int. J. Energy Res. (in press), 1996.

[6] **Rich, D. G.:** *The effect of fin spacing on heat transfer and friction performance of multi-row smooth plate fin nad tube heat exchanger,* ASHRAE Trans., Vol. 79, 1973, pp. 137–145.

[7] **Threlkeld, J. L.:** *Thermal Environmental Engineering,* Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1972.

[8] **Travis, D. P., W. M. Rohsenow and A. B. Baron:** *Force convection condensation inside tube: A heat transfer equation for condensor design,* ASHRAE Trans., Vol. 79, 1973, pp. 157–165.

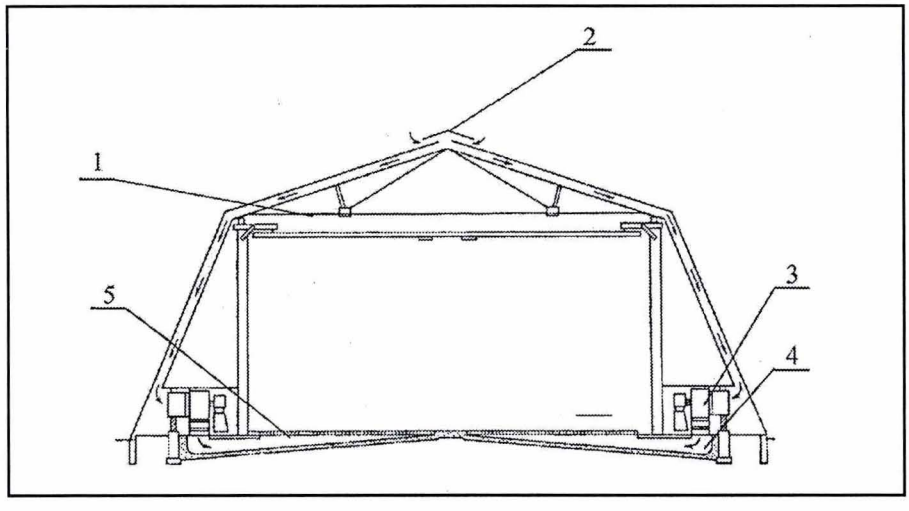
PROCESNA TEHNIKA

Solarna stacionarna sušara sa nedemontažnim solarnim prijemnikom

Za zagrevanje vazduha, u svojstvu agensa sušenja može se koristiti solarna energija. U korišćenju solarne energije u procesu sušenja, poseban problem predstavlja mala iradijacija, jer oscilacije intenziteta sunčevog zračenja u različito doba dana i godišnje doba ima u ovom slučaju povoljan utica. Prema raspoloživim podacima, srednji intenzitet solarnog zračenja na horizontalnu površinu u SRJ u toku dana (od 7 do 19 h), u periodu ubiranja poljoprivrednih proizvoda, iznosi oko 600 W/m^2, a na površinu postavjenu pod uglom od 20° u odnosu na horizontalnu površinu, orijentisanu ka jugu, iznosi oko 670 W/m^2.

Za transformaciju energije solarnog zračenja u toplotu, koristi se solarni prijemnik, koji se sastoji od plastične (stakloplastika) apsorbujuće površine, crno obojene i providne armirane folije. Srednja vrednost stepena korisnosti ovakvog prijemnika pri brzini strujanja vazduha od 4 m/s je oko 0,56.

Ova razmatranja se mogu iskoristiti kao polazna osnova pri projektovanju novih solarnih sušara, ili u te svrhe rekonstrukciji postojećih. Sušara na slici 1 predstavlja konstrukciju čija osnova ima dimenzije a x b. Krov sušare je izveden od stakloplastike i postavljen je na metalnu ili betonsku konstrukciju visine c. Stakloplastika u ovom rešenju ima funkciju noseće konstrukcije, graničnih zidova i solarnog prijemnika. Ukupna prijemna površina solarnog kolektora je površina krova i bočnih zidova komore za sušenje. Za strujanje zagrejanog vazduha, agensa sušenja, kroz prijemnik, komoru za sušenje i materijal koji se suši, koriste se centrifugalni ventilatori.



Slika 1. Univerzalna solarna sušara; 1. kanal solarnog prijemnika, 2. sistem za ulaz svežeg vazduha, 3. ventilator, 4. sistem za raspodelu vazduha, agensa sušenja, 5. perforirani pod

Zagrejan vazduh, agens sušenja, uvodi se u komoru za sušenje kroz perforirani pod.

Zavisno od dimenzija sušare i materijala koji se suši, unutar komore za sušenje se mogu postaviti nosači, police sa tavama, ili dodatni rešetkasti kanali za distribuciju vazduha. Sušara se može koristiti više puta u sezoni za isti ili različit materijal, pa se može smatrati univerzalnim rešenjem.

Prof. Radivoje M. Topić