

PRORAČUN KOMORNE SUŠARE ZA PEČURKE DESIGN OF CHAMBER DRYER FOR MUSHROOMS

Nikola Milivojević, Damir Đaković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – U okviru rada prikazan je primer proračuna i konstrukcije jedne konvektivne komorne sušare sa podovima za sušenje pečurki. Cilj rada je razmatranje više mogućih rešenja za zagrevanje agensa sušenja, sa fokusom na upotrebu obnovljivih izvora energije umesto konvencionalnih goriva, pre svega toplotnih pumpi. Na osnovu definisanog sistema, odabrana je odgovarajuća konstruktivna izvedba sušare.

Ključne reči: komorna sušara, pečurke, toplotna pumpa

Abstract – This paper represents an example of calculation and design of convective hot air chamber dryer with trays for drying mushrooms. Aim of this paper is analysis of few possible solutions for heating of drying air, with focus on use of renewable energy sources instead conventional fuels, especially heat pumps. Based on defined system for heating air, suitable design of represented dryer is selected.

Keywords: Chamber dryer, mushrooms, heat pump

1. UVOD

Sušenje predstavlja jedan od osnovnih načina preradu i čuvanje prehrambenih proizvoda sa visokim sadržajem vlage, sa težnjom da se u tom procesu ostvari što manje uticaja na njihove nutritivne karakteristike. Sam proces sušenja zahteva značajnu potrošnju toplotne energije, pa kao takav ostavlja prostora za mnoga istraživanja na polju poboljšanja energetske efikasnosti procesa. Zadržavanje kvaliteta osušenog proizvoda visokom nivou, uz što manju potrošnju energije, predstavlja jedan od najvećih izazova za stručnjake iz ove oblasti

Kao jedan od najčešće uzgajanih prehrambenih proizvoda i u svetu i kod nas smatraju se pečurke. Spadaju u grupu jestivih gljiva, sa preko 2000 vrsta koje danas postoje, od kojih su 22 intenzivno uzgajane u komercijalne svrhe, širom sveta [1]. U našoj zemlji je zastupljeno uzgajanje i korišćenje gljiva, i to uglavnom sledećih vrsta:

- Šampinjoni (*Agraricus bisporus*)
- Bukovače (*Pleurotus plumonarius*)
- Šitaki pečurke (*Lentinula edodes*)

Pečurke spadaju u red proizvoda sa visokim sadržajem vlage, što ih čini izuzetno osetljivim na uslove u kojima se čuvaju i transportuju. Vlažnosti svežih pečurki može

znatno da varira i zavisi od mnogobrojnih faktora, od uslova u kojima su odgajani, preko klimatskih uslova podneblja na kojima se gaje ili rastu u prirodi, do perioda godine u kome su sveže pečurke ubrane. Prema [1], vlažnost svežih pečurki varira u opsegu od 87% - 95% po vlažnoj osnovi, što ih čini proizvodima lako podložnim kvarenju.

2. PRORAČUN KOMORNE SUŠARE

Proračunom odabrane komorne sušare obuhvaćen je materijalni bilans sušare i termički proračun sušare. Cilj ovog proračuna je određivanje radnih parametara procesa sušenja, usvajanje potrebne opreme i određivanje odgovarajuće konstruktivne izvedbe sušare.

2.1 Materijalni bilans sušare

Materijalnim bilansom sušare određuju se količine osušenog materijala i izdvojene vlage, na osnovu zadatog kapaciteta sušare, na bazi vlažnog materijala. Sušara se projektuje za sušenje 100 kg pečurki po jednom punjenju. Usvojena početna vlažnost pečurki je $w_1 = 90\%$ (po vlažnoj osnovi) i proces sušenja traje do dostizanja krajnje vlažnosti osušenog materijala od $w_2 = 10\%$ (po vlažnoj osnovi). Materijalni bilans sušare po ukupnoj masi i po količini vlage je definisan jednačinama:

$$G_1 \cdot w_1 = W + G_2 \cdot w_2 \quad (1)$$

$$G_1 \cdot w_1 = W + (G_1 - W) \cdot w_2 \quad (2)$$

U prikazanom slučaju, od 100 kg svežih pečurki, izdvojena količina vlage je $W = 88,9$ kg, dok je dobijena količina osušenih pečurki iz jedne šarže $G_2 = 11,1$ kg.

2.2 Termički proračun sušare

U okviru termičkog proračuna sušare određena je potrebna količina toplote koju je potrebno dovesti u procesu sušenja. Planirani period rada sušare u toku godine je april - septembar, zbog povoljnih vremenskih uslova Predviđeno je sušenje pečurki u tankom sloju, poprečnim nastrujavanjem zagrejanog vazduha preko vlažnog materijala postavljenog na lese unutar komore za sušenje. Prema preporukama iz [2], odabrana temperatura vazduha za sušenje pečurki je $t_1 = 60\text{ °C}$ na ulazu u sušaru, i $t_2 = 40\text{ °C}$ na izlazu iz sušare, sa brzinom strujanja od 1 m/s. Sistem je projektovan prema najnepovoljnijim uslovima u odabranom periodu, najnižoj jutarnjoj temperaturi vazduha za mesec april od $8,3\text{ °C}$ i relativnoj vlažnosti od 82% [3]. Potrebna količina zagrejanog vazduha za sušenje zadate količine pečurki, na osnovu usvojenih parametara sušenja se, prema [4], izračunava preko jednačine

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Damir Đaković, vanr. prof.

i iznosi $L = 12.054 \text{ kg}_{\text{sv}}$, gde su $x_1 = 0,0057 \text{ kg}_w/\text{kg}_{\text{sv}}$ i $x_2 = 0,013 \text{ kg}_w/\text{kg}_{\text{sv}}$ apsolutne vlažnosti vazduha na ulazu i izlazu iz sušare [4,5]. Potrebna količina toplote u procesu sušenja, prema [4], je

$$Q = Q_i + Q_m + Q_o + Q_2 + Q_d + Q_t \pm Q_x \quad (4)$$

gde su:

- $Q_i = 225.446 \text{ kJ}$ - količina toplote potrebna za isparavanje vlage iz materijala
- $Q_m = 266,4 \text{ kJ}$ - količina toplote potrebna za zagrevanje materijala
- $Q_o = 24828 \text{ kJ}$ - količina toplote koja se predaje okolini
- $Q_2 = 402.974 \text{ kJ}$ - količina toplote dovedena agensu sušenja
- $Q_d = 0 \text{ kJ}$ - količina toplote potrebna za izdvajanje hemijski vezane vlage
- $Q_t = 0 \text{ kJ}$ - količina toplote za zagrevanje naknadno unetih masa i transportnih uređaja.

3. KINETIKA SUŠENJA

U okviru kinetike procesa sušenja analizirana je zavisnost procesa sušenja od vremena. Određivanje vremena trajanja procesa sušenja predstavlja veoma kompleksan problem, jer se vreme sušenja razlikuje od materijala do materijala. Najpotpunija slika odvijanja procesa sušenja se dobija analiziranjem krive sušenja, koja daje zavisnost srednje vlažnosti materijala od vremena trajanja procesa sušenja i krive brzine sušenja, koja daje zavisnost između brzine sušenja i vlažnosti materijala. Procena vremena trajanja sušenja za konkretan primer sušenja pečurki, odabran u okviru ovog rada, izvršeno je na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka iz dostupne literature. Prema [2], kriva sušenja pečurki, konkretno šampinjona, za sušenje u tankom sloju pri temperaturi vazduha 60°C i brzini strujanja 1 m/s , može se opisati logaritamskim matematičkim modelom

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + c \quad (5)$$

gde je MR sadržaj vlage (moisture ratio), τ vreme sušenja u časovima, $a = 1,052187$, $k = 0,23897$, $c = -0,06599$, eksperimentalne konstante. Vrednost MR se određuje jednačinom

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

gde je M vlažnost materijala po svojoj osnovi u bilo kom trenutku sušenja, M_0 početna vlažnost materijala po svojoj osnovi i M_e ravnotežna vlažnost. Za početnu vlažnost pečurki 90% i krajnju 10% , sa temperaturom vazduha 60°C i brzinom strujanja vazduha 1 m/s , vreme potrebno za sušenje odabrane količine pečurki je 11 h . Specifična potrošnja vazduha po kilogramu isparene vlage se izračunava iz jednačine

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

i iznosi $137,1 \text{ kg}_{\text{sv}}/\text{kg}_w$. Na osnovu maksimalne potrebne količine vazduha u prvom satu sušenja od $0,9 \text{ kg/s}$, dimenzionisan je odgovarajući razmenjivač toplote za zagrevanje vazduha i odgovarajući ventilator.

4. ANALIZA RADA SISTEMA ZA ZAGREVANJE VAZDUHA

Zgrevanje vazduha se vrši cevnim razmenjivačem toplote sa orebrenim bakarnim cevima, Proračun potrebne toplotne snage razmenjivača toplote izvršen je za temperaturu vazduha u mesecu aprilu u 7 h pre podne ($8,3^\circ\text{C}$ [3]) i temperaturu zagrevanja vazduha 60°C . Potrebna toplotna snaga razmenjivača toplote je određena jednačinom

$$\dot{Q} = \dot{L} \cdot c_{pv} \cdot (t_2 - t_1) \quad (8)$$

gde je:

- $\dot{Q} = 46,7 \text{ kW}$ - toplotna snaga razmenjivača toplote
- $\dot{L} = 0,9 \text{ kg/s}$ - potrebna količina vazduha za sušenje
- $c_{pv} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ - specifični toplotni kapacitet vazduha
- $t_2 = 60^\circ\text{C}$ - temperatura zagrejanog vazduha
- $t_1 = 8,3^\circ\text{C}$ - temperatura okolnog vazduha

Toplotna snaga razmenjivača toplote iznosi $46,7 \text{ kW}$. Zagrevanje vazduha se vrši vodom temperature na ulazu u razmenjivač od 80°C i na izlazu 65°C . Za zagrevanje vode će biti usvojen odgovarajući sistem, čija će analiza rada biti data u nastavku. Na osnovu potrebnog protoka vazduha, usvojen je zidni aksijalni ventilator proizvođača S&P, serije COMPACT, tip HCBT/2-315/G.

4.1 Definisane periode rada sušare

Odabrana komorna sušara je predviđena za dnevni rad u periodu $7 \text{ h} - 18 \text{ h}$, zbog mogućnosti korišćenja sunčeve energije. Kako je potrebna toplotna snaga od $46,7 \text{ kWh}$ neophodna samo u prvom satu sušenja, kako proces odmiče, sa rastom temperature okoline smanjuje se i potrebna količina toplote za zagrevanje vazduha. Ukupna potrebna količina toplote za zagrevanje vazduha u toku sušenja jedne šarže pečurki data je u tabeli 1.

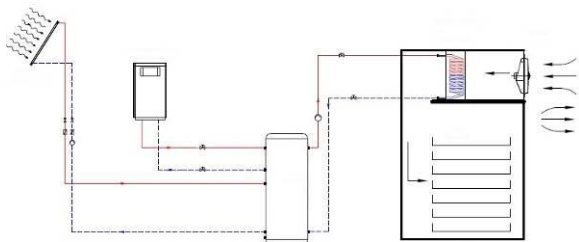
Tabela 1. Časovno toplotno opterećenje sistema za zagrevanje vazduha

Vreme [h]	Prosečna temperatura vazduha [$^\circ\text{C}$]	Potrebna toplotna energija [kWh]
7	8,3	46,76
8	12,5	32,05
9	14,1	24,35
10	15,5	18,53
11	16,3	14,29
12	17,0	11,14
13	17,4	8,69
14	17,6	6,85
15	17,2	5,45
16	16,5	4,25
17	15,5	3,02
Ukupno		175,4

Za usvojeni period rada sušare, sistem za zagrevanje vazduha mora biti dimenzionisan tako da obezbedi $175,4 \text{ kWh}$ toplotne energije za zagrevanje vazduha u toku jedne šarže sušenja. U nastavku će biti dati rezultati analize rada više različitih sistema za zagrevanje vazduha

4.2 Sistem za zagrevanje vazduha sa gasnim kondenzacionim kotlom solarnim kolektorima

Sistem se sastoji od gasnog kondenzacionog kotla, snage 51,5 kW, 20 solarnih kolektora i akumulacionog rezervoara od 2000 l. Simulacija rada sistema je izvršena u softveru „TSol”, u kom je prethodno definisan navedeni sistem, za klimatske uslove na području Novog Sada na mesečnom nivou za april. Na slici 1. je prikazana konfiguracija odabranog sistema i raspored opreme.



Slika 1. Sistem zagrevanja vazduha sa gasnim kondenzacionim kotlom i solarnim kolektorima

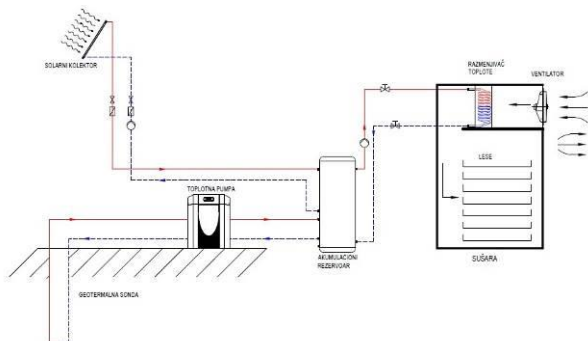
Simulacijom rada navedenog sistema, maksimalna dnevna potrošnja prirodnog gasa u toku meseca je 28 m³, odnosno 267 kWh. Za vrednost donje toplotne moći prirodnog gasa od 34.432 kJ/m³ i cenu prirodnog gasa 38,736 RSD/m³ [7], troškovi goriva po šarži osušenog materijala iznose 1084,6 RSD/šarži. Veličina prema kojoj će se upoređivati efikasnost rada prikazanih sistema je SMER (specific moisture evaporation rate), koji predstavlja odnos količine isparene vlage W u procesu sušenja i potrošnje energije u sistemu E.

$$SMER = \frac{W}{E} \left[\frac{kg_w}{kWh} \right] \quad (9)$$

Za prikazani sistem SMER iznosi 0,33 kg_w/kWh.

4.3 Sistem za zagrevanje vazduha sa toplotnom pumpom zemlja - voda i solarnim kolektorima

Sistem se sastoji od istih elemenata kao i prethodni, sa razlikom što je umesto gasnog kotla osnovni izvor toplote toplotna pumpa zemlja - voda snage 46 kW sa COP = 4,5. Kod ove vrste toplotne pumpe vrednost COP je konstantna, zbog konstantne temperature zemlje na većim dubinama, koja predstavlja izvor toplote za rad toplotne pumpe. Simulacija rada sistema je takođe izvršena u softveru „TSol”. Na slici 2. je dat šematski prikaz navedenog sistema.



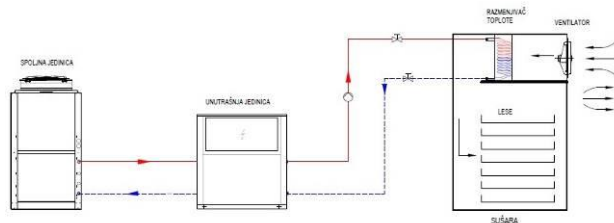
Slika 2. Sistem za zagrevanje vazduha sa toplotnom pumpom zemlja - voda i solarnim kolektorima

Prema dobijenim rezultatima simulacije rada u toku meseca aprila, ukupna potrošnja električne energije za rad

toplotne pumpe iznosi 1062 kWh, što daje prosečnu potrošnju električne energije po jednoj šarži sušenja od 35,4 kWh. Za cenu električne energije u zelenoj i plavoj zoni potrošnje u višoj tarifi od 5,962 RSD/kWh i 8,943 RSD/kWh prema [6], troškovi električne energije za sušenje jedne šarže pečurki iznose 396,2 RSD/šarži. Vrednost SMER za prikazani sistem je 2,51 kg_w/kWh.

4.4 Sistem za zagrevanje vazduha sa toplotnom pumpom vazduh - voda

U navedenom sistemu, za zagrevanje vazduha samostalno je primenjena toplotna pumpa vazduh - voda, iz razloga što ovaj tip toplotnih pumpi znatno zavisi od temperature okolnog vazduha. Zbog toga, za zagrevanje vode na temperature od preko 65 °C, neophodna je upotreba dvostepenih toplotnih pumpi većih snaga, koje su znatno skuplje od ostalih, pa bi cena ukupne investicije sa solarnim kolektorima bila jako visoka. Analizirana toplotna pumpa snage 60 kW ima promenljiv COP u odnosu na temperaturu okolnog vazduha, pa se za varijacije temperature u periodu sušenja koji je usvojen, kreće u opsegu 2,29 - 2,43. Na slici 3. je prikazana šema razmatranog sistema.



Slika 3. Sistem za zagrevanje vazduha sa toplotnom pumpom vazduh - voda

Za prikazani sistem, dnevna potrošnja električne energije za rad toplotne pumpe u toku meseca aprila, a u svrhu obezbeđivanja potrebne količine toplote za zagrevanje vazduha je određena iz odnosa potrebne količine toplote Q iz tabele 1. i vrednosti COP posmatrane toplotne pumpe

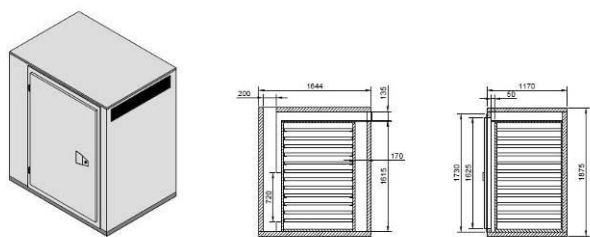
$$E_{el} = \frac{Q}{COP} \quad (10)$$

iznosi 73,42 kWh. Ukupna mesečna potrošnja električne energije za rad toplotne pumpe iznosi 2202 kWh, čime se ulazi u crvenu zonu potrošnje što iziskuje veće troškove rada. Za ranije navedene cene električne energije u zelenoj i plavoj zoni, i uz cenu električne energije u crvenoj zoni od 17,877 RSD/kWh [6], troškovi električne energije za sušenje jedne šarže pečurki iznose 1070,6 RSD/šarži. Vrednost SMER za posmatrani sistem iznosi 1,21 kg_w/kWh.

5. KONSTRUKCIJA KOMORNE SUŠARE

Konstrukcija komore za sušenje izvedena je od termoizolacionih panela sa spoljnim zidovima od nerđajućeg čelika (prohrom) čija je upotreba obavezna u prehrambenoj industriji, i ispunom od mineralne vune. Unutar komore za sušenje je na odgovarajući ram postavljeno 12 leša za vlažni materijal dimenzija 1x1m, takođe izrađenih od nerđajućeg čelika, sa dnom od prohromske mreže. Strujanje vazduha u komori za sušenje ostvareno je u dva prolaza.

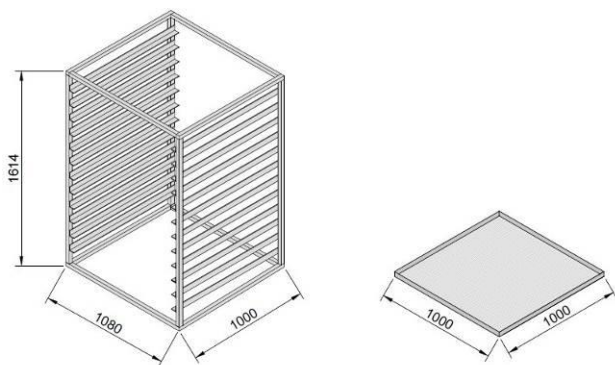
Kanal za dovod vazduha u kome su postavljeni razmenjivač toplote i ventilator se nalazi na konstrukciji komore za sušenje. Gabaritne dimenzije komore za sušenje su 1644 x 1170 x 1875 mm (dužina x širina x visina). Na slici 4. je prikazana komora za sušenje.



Slika 4. Komora za sušenje

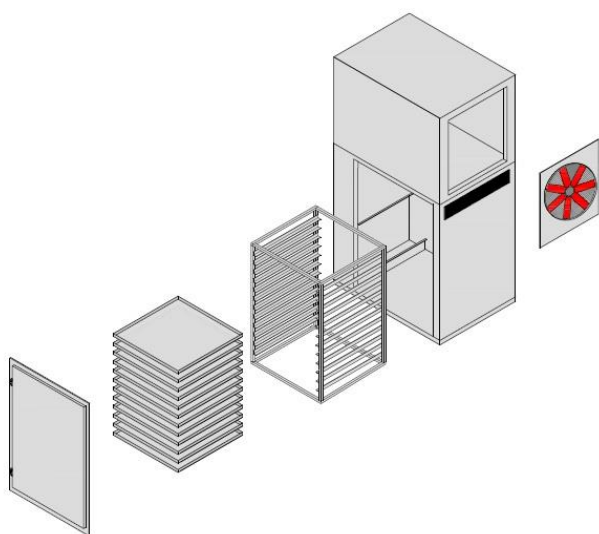
Lese sa vlažnim materijalom se postavljaju na ram prikazan na slici 5. preko odgovarajućih L profila.

Pošto se ram sa lesama nalazi u komori za sušenje, u dodiru je sa vlažnim vazduhom, pa je neophodno da bude od materijala koji nije podložan koroziji.



Slika 5. Dimenzije rama i lese

Na slici 6. prikazan je raspored osnovnih elemenata prikazane komorne sušare.



Slika 6. Osnovni elementi komorne sušare

6. ZAKLJUČAK

Iz prikazane analize sistema za zagrevanje vazduha, očigledno je da, sa energetske strane, primena toplotnih pumpi u odnosu na kotlove na konvencionalna goriva ima veliku prednost. Upotrebom odgovarajuće vrste toplotne pumpe, troškovi rada sušare u prikazanim sistemima se mogu umanjiti za oko 60 %. Rešenje sa toplotnom pumpom zemlja - voda i solarnim kolektorima se pokazalo kao najbolje i sa strane troškova rada, i sa strane vrednosti SMER, kao pokazatelja efikasnosti rada sušare. Toplotna pumpa vazduh - voda u samostalnom radu dala je lošije rezultate nego kombinacija toplotne pumpe zemlja - voda i solarni kolektori, ali je bila efikasnija od sistema sa gasnim kotlom i solarnim kolektorima. Takođe, upotreba električne energije umesto prirodnog gasa kao energenta, omogućava nezavisnost od mogućih povećanja cena prirodnog gasa.

Najveća prednost toplotnih pumpi se ogleda u tome što za svoj rad koriste niskotemperaturske obnovljive izvore energije, kojih ima u neograničenim količinama i mogu se primenjivati na bilo kojoj lokaciji. Iz svega navedenog, može se zaključiti da je primena toplotnih pumpi u procesima sušenja apsolutno opravdana, čak i pored relativno visokih investicionih ulaganja.

7. LITERATURA

- [1] Arora, S., Shivhare U. S., Ahmed, J., Raghavan, G. S. V., (2003), "Drying kinetics of *agricarius bisporus* and *pleurotus florida* mushrooms", Transactions of the ASAE, Vol 46(3), pp. 721-724
- [2] Stegou-Sagia, A., Fragkou, D. V., (2015), "Influence of drying conditions and mathematical models on the drying curves and the moisture diffusivity of mushrooms", Journal of Thermal Engineering, Vol 1, No 4, pp. 235-244.
- [3] "Meteorološki godišnjak - klimatološki podaci", (2017), Beograd, Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije.
- [4] Topić, R. (2014), "Sušenje i sušare", Beograd, SMEITS.
- [5] Topić, R. (1989), "Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara", Beograd: IRO Naučna knjiga.
- [6] www.eps-snabdevanje.rs, (pristupljeno u martu 2019.)
- [7] www.srbijagas.com, (pristupljeno u martu 2019.)

Kratka biografija



Nikola Milivojević je rođen u Požarevcu 1993. god. Upisao osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2012. god, oblast Mašinstvo - Energetika i procesna tehnika. Trenutno zaposlen na Fakultetu tehničkih nauka kao saradnik u nastavi na Katedri za procesnu tehniku.



Damir Đaković je rođen 1975. godine u Sremskoj Mitrovici. Diplomirao, magistrirao i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Zainteresovan za mogućnosti praktične primene spregnutih problema prenosa toplote i mase u sušenju i drugim oblastima energetike i procesne tehnike.