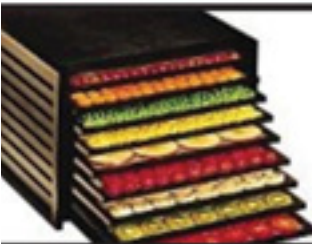


Radivoje M. Topić

# SUŠENJE I HIGROTHERMIČKI PROCESI





**MAŠINSKI FAKULTET  
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**Prof. dr Radivoje M. Topić**

**SUŠENJE I HIGROTERMIČKI  
PROCESI**

**Beograd 2013.**

Prof.dr Radivoj M. Topić

SUŠENJE I HIGROTERMIČKI PROCESI  
I izdanje

*Izdavač:*

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET  
Kraljice Marije br. 16, 11 000 Beograd

*Za izdavača:*

Dekan, prof. dr Milorad Milovančević

*Urednik:*

Prof. dr Aleksandar Obradović

*Recenzenti:*

Prof. dr Martin Bogner  
Prof. dr Bogosav Vasiljević

*Tehnički urednik:*

Goran Janjić, dipl. inž. maš.

*Korice:*

Aleksandra Dolović

*Štampa i povez:*

“Planeta print”, Ruzveltova br.10.  
11 000 Beograd

*Odobreno za štampu:*

Odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu  
br. 238/13 od 20. 6. 2013.

*Tiraž:*

100 primeraka

ISBN 978-86-7083-795-9

---

---

# SADRŽAJ

---

---

<b>PREDGOVOR</b> .....	5
<b>Glava I • FIZIČKO HEMIJSKI OSNOVI PROCESA SUŠENJA</b> .....	7
1.1. VLAŽAN GAS (VAZDUH).....	7
1.2. VLAŽAN MATERIJAL.....	44
1.2.1. Postupci dređivanja vlažnosti materijala i odgovarajući uređaji i instrumenti.....	49
1.3. STATIKA PROCESA SUŠENJA.....	71
1.4. LABORATORIJSKE VEŽBE.....	80
1.4.1. Određivanje fizičko mehaničkih svojstava disperznih materijala.....	80
1.4.2. Određivanje vlažnosti vlažnih materijala.....	82
1.4.3. Određivanje poroznosti vlažnih materijala.....	84
<b>Glava II • OSNOVI TEORIJE PRENOSA ENERGIJE I VLAGE U PROCESU SUŠENJA</b> .....	87
2.1. KINETIKA PROCESA SUŠENJA.....	87
2.2. PRENOS TOPLOTE I MATERIJE U PROCESU SUŠENJA.....	93
2.2.1. Profili vlažnosti i temperatura, gradijenti i fluksevi prenosa.....	97
2.2.2. Diferencijalna jednačina transporta toplote i materije na osnovu zakona o održanju.....	105
2.3. LABORATORIJSKA VEŽBA.....	108
2.3.1. Izučavanje procesa sušenja materijala u konvektivnim sušarama.....	108
<b>Glava III • OSNOVI TEHNIKE SUŠENJA</b> .....	111
3.1. UVODNE NAPOMENE I OSNOVNI NAČINI IZDVAJANJA VLAGE.....	111
3.2. OSNOVNI NAČINI TERMIČKOG SUŠENJA.....	117
3.2.1. Šematski prikaz načina opstrujavanja (prelaženje toplote između agensa sušenja i materijala).....	118
3.2.2. Načini konvektivnog sušenja s intenzificiranom razmenom toplote.....	119
3.2.3. Načini zagrevanja, dovođenja toplote, kod konduktivnog načina sušenja.....	122
3.2.4. Sušenje pod dejstvom energetskih polja.....	124
<b>Glava IV • KRATKI PREGLED POSTROJENJA ZA SUŠENJE I OSNOVE INŽENJERSKOG PRORAČUNA</b> .....	135
4.1. KLASIFIKACIJA I KRATAK PREGLED POSTROJENJA ZA SUŠENJE.....	135
4.2. OSNOVI PRORAČUNA POSTROJENJA ZA SUŠENJE.....	139
4.2.1. Materijalni bilans procesa sušenja.....	139

4.2.2. Toplotni bilans procesa sušenja .....	141
4.2.3. Varijante procesa sušenja .....	149
<b>Glava V • TERMOFIZIKA PROIZVODNIH OBJEKATA .....</b>	<b>167</b>
5.1. KARAKTERISTIKE PROIZVODNIH OBJEKATA .....	167
5.1.1. Termofizičke karakteristike graničnih zidova konstrukcije .....	168
5.1.2. Termoakumulaciona sposobnost poda.....	169
5.1.3. Toplotna stabilnost prostorije.....	170
5.1.4. Vlažnosni režimi graničnih površi .....	170
5.1.5. Vazdušni režim poljoprivrednih objekata .....	171
<b>Glava VI • PRIMENA TOPLOTE U FARMAMA I KOMPLEKSIMA ZA STOKU .</b>	<b>173</b>
6.1. MIKROKLIMA U OBJEKTIMA ZA STOKU I ŽIVINU .....	173
<b>Glava VII • OBJEKTI SA ZAŠTIĆENIM PROSTOROM.....</b>	<b>175</b>
7.1. UVODNA RAZMATRANJA O ZAŠTIĆENIM PROSTORIMA.....	175
<b>Glava VIII • TEHNOLOŠKE OSNOVE SKLADIŠTENJA PROIZVODA .....</b>	<b>179</b>
8.1. USLOVI SKLADIŠTENJA, TIPOVI SKLADIŠTA I NAČINI SKLADIŠTENJA.....	179
<b>Glava IX • KORIŠĆENJE NISKIH TEMPERATURA U POLJOPRIVREDNOJ PROIZVODNJI.....</b>	<b>185</b>
9.1. FIZIČKA SUŠTINA I NAČINI HLAĐENJA .....	185
9.1.1. Načini hlađenja .....	185
<b>Glava X • EKONOMIJA TERMOENERGETSKIH RESURSA I TERMOTEHNIČKI POKAZATELJI .....</b>	<b>187</b>
10.1. UVODNE NAPOMENE .....	187
10.2. KORIŠĆENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE .....	187
10.3. KORIŠĆENJE SEKUNDARNIH ENERGETSKIH RESURSA .....	189
10.3. USAVRŠAVANJE KONSTRUKCIJE SISTEMA VENTILACIJE I POVEĆANJE TERMIČKIH OTPORA ZIDOVA.....	190
<b>LITERATURA .....</b>	<b>191</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>195</b>
PRILOG 1 • KRATAK PRIKAZ: OPERACIJA PRIPREME, KARAKTERISTIKA MATERIJALA I PROCESA SUŠENJA.....	195
PRILOG 2 • ŠIRI PRIKAZ PROCESA I NAČINA SUŠENJA VOĆA I POVRĆA, LEKOVITOG I ZAČINSKOG BILJA, HMELJA, DUVANA I DRUGIH PROIZVODA.....	200

---

---

## PREDGOVOR

---

---

Sušenje je nestacionarni termodinamički (fizičko hemijski) i složen tehnološki proces, koji mora da obezbedi ne samo očuvanje kvalitativnih pokazatelja materijala, već i u nizu slučajeva poboljšanje tih pokazatelja.

U procesu sušenja učestvuju dve inertne faze: čvrsta i gasovita; pri tome isparena vlaga prelazi iz čvrste u gasovitu fazu. Gasovita faza, koja učestvuje u procesu sušenja, naziva se agensom sušenja.

Poznavanje osobina vlažnog vazduha je neophodno za razumevanje fizičke suštine procesa sušenja, pošto su najveću primenu dobila postrojenja za sušenje u kojima se odvijaju spregnuti procesi prenosa toplote i materije između vazduha i materijala koji se suši. Kod jednih postrojenja, vazduh upija vlagu i odnosi je, dok kod drugih još ima ulogu i izvora toplote neophodne za isparavanje vlage. U procesu sušenja, parametri i svojstva vlažnog vazduha se stalno menjaju. Vlažan gas predstavlja smešu suvog gasa i vlage.

Najrasprostranjenija postrojenja za sušenje su ona kod kojih je okolina zagrejani atmosferski vazduh ili mešavina vazduha i produkata sagorevanja. Pošto atmosferski vazduh uvek sadrži neku količinu vlage u obliku vodene pare, proces sušenja se može razmatrati kao proces uzajamnog dejstva vlažnog vazduha s vlažnim materijalom. *U cilju razumevanja tog procesa neophodno je znati svojstva vlažnog vazduha i vlažnog materijala.*

Racionalno korišćenje toplote je nemoguće bez ovladavanja teorijom toplotnih procesa i poznavanja osnovnih zakona transformacije energije koji su po pravilu osnovni u različitim tehnološkim procesima. Ogromna količina toplote se koristi na zagrevanje i ventilaciju, na obezbeđenje mikroklima u stočarskim i živinarskim objektima, skladištima i objektima sa zaštićenim prostorom, za sušenje proizvoda, pripremu hrane, obezbeđenja veštačkog hlađenja i druge svrhe. U svim navedenim slučajevima prenos toplote se ostvaruje prenosom toplote i materije. Izučavanje zakona prenosa toplote u tehnološkim procesima omogućava određivanje optimalnih načina upravljanja navedenim procesima.

U vezi sa sve strožijim zahtevima ušteda energetske resursa, problema zaštite okoline značajno je porasla uloga inženjera energetičara.

Zbog toga se daju razmatranja, koja su neophodna inženjerima za efikasnu eksploataciju energetske opreme i rešenja zadataka racionalnog korišćenja toplote u različitim oblastima.

Autor će smatrati da je ostvario svoj cilj, ako ova knjiga obezbedi studentima lakše izučavanje ove problematike a inženjerima, projektantima i konstruktorima olakša rad u oblasti sušenja i higrotermičkih procesa.

Autor zahvaljuje uvažanim recenzentima na dragocenim i korisnim savetima i sugestijama. Sve dobronamerne primedbe, uočene greške i sugestije autor će rado prihvatiti.

*Autor*