

UNIVERZITET U NOVOM SADU

TEHNIČKI FAKULTET ²MIHAJLO PUPIN², ZRENJANIN

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR
Identifikacioni broj
IBR
Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD
Tip zapisa: Tekstualni štampani zapis
TZ
Vrsta rada: Doktorska disertacija
VR
Autor: Mr Slavica Prvulović, dipl. inž.
AU
Mentor/Ko-mentor: Prof. dr Dragiša Tolmač, dipl. inž.
MN

Naslov rada: NS Modelovanje mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanje numeričkih pokazatelja

Jezik publikacije: Srpski
JZ
Jezik izvoda: Srpski
JI
Zemlja publikovanja: Srbija i Crna Gora
ZP
Uže geografsko područje: Vojvodina
UGP
Godina: 2004.
GO
Izdavač: Autorski reprint
IZ
Mesto i adresa: 23000 Zrenjanin, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin"
MS
Fizički opis rada: (broj poglavlja / strana / tabela / slika)
FO (7 / 112 / 29 / 16)
Naučna oblast: Procesna tehnika
OB
Naučna disciplina: Toplotne operacije

DI

Predmetna odrednica/Ključne reči: Konvektivno sušenje; energetske karakteristike;
PO pneumatske sušare; prenos toplote.

UDK: 66.047 + 621.643

Čuva se: U biblioteci Tehničkog fakulteta "M. Pupin" Zrenjanin,
ČU FTN, Novi Sad.

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Doktorska disertacija "Modelovanje mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanje numeričkih pokazatelja" - sadrži eksperimentalna i teorijska istraživanja vezana za metodu konvektivnog sušenja. Izvršena su istraživanja parametara sistema konvektivne pneumatske sušare u eksploatacionim uslovima proizvodnje. Na osnovu rezultata ispitivanja utvrđeni su: modeli kinetike sušenja, energetske bilansi, koeficijenti prenosa toplote, optimalni režim sušenja, modeli mehanizma prenosa toplote, numerički pokazatelji i izvršena njihova analiza.

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

(Naučni stepen / ime i prezime / zvanje / fakultet)

KO

Predsednik komisije:

Članovi komisije:

Mentor:

Prof. dr Dragiša Tolmač, dipl. inž. maš.

Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin.

UNIVERSITY OF NOVI SAD

TEHNICAL FACULTY "MIHAJLO PUPIN" ZRENJANIN

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO
Indentification number:
INO
Document type: Monografic documentation
DT
Type od record: Textual printed materijal
TR
Contents code: Doctorate
CC
Author: Slavica Prvulovic, Ms.C.
AU
Menthor, co-Menthor: Dragisa Tolmac, Ph.D.
MN
Title: Analysis of energy characteristics of pneumatics
dryers, from the standpoint of the development of
convective drying method

Language of text: Serbien
LT
Language of obstract: Serbien
LS
Contry of publication: Serbia and Monte Negro
CP
Publication year: 2004.
PY
Publicher: The author's reprint
PB
Publ. place: Zrenjanin, Serbia.
PL
Physical description: (chapters / pages / tables / pictures)
PD (7 / 112 / 29 / 16)

Scientific field: Process technique
SF
Scientific discipline: Heat transfer
SD
Subject/Key words: convective drying; energetic characteristics;
CX pneumatich dryers; heat transfer.
UC 66.047; 621.643
Holding data: In the library of the Faculty technique "M. Pupin"
HD Zrenjanin
Note:
N
Abstract:
AB

PhD Thesis "Modelling the mechanism for heat transfer at the convective drying and establishing of numerical readers" - contains the experimental and theoretical researches connected with the convective drying method. The parameter researches of the convective pneumatic dryer system in the exploitation conditions in production, are done. On the basis of the testing results are established: the models of drying kinetics, energetic bilances, heat transfer coefficients, optimal regime of drying, heat transfer models mechanism, numerical readers and there was also realized their analysis.

Accepted by the Scientific Board on.

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

(Degree / name / surname/ title / faculty)

DB

President:

Member:

Mentor:

Prof. dr Dragisa Tolmac

Technical faculty "M. Pupin", Zrenjanin.

**Univerzitet u Novom Sadu
Tehni~ki fakultet ²Mihajlo Pupin²
Zrenjanin**

**MODELOVANJE MEHANIZMA PRENOSA TOPLOTE PRI
KONVEKTIVNOM SUŠENJU I UTVRĐIVANJE
NUMERIČKIH POKAZATELJA**

Doktorska disertacija

**Mentor:
Prof. dr Dragiša Tolmač**

**Kandidat:
Mr Slavica Prvulović**

Zrenjanin, 2004. god.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| PREDGOVOR | |
| UVOD | |
| I. PREDMET ISTRAŽIVANJA | 8 |
| II. CILJ ISTRAŽIVANJA | 8 |
| III. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA | 9 |
| | |
| 1. IZVOD IZ TEORIJE PROCESA SUŠENJA | 10 |
| 1.1. Statika procesa sušenja | 12 |
| 1.1.1. Vlažan materijal i ravnotežna vlažnost | 12 |
| 1.1.2. Potencijal prostiranja vlage | 15 |
| 1.1.3. Mehanizam prostiranja vlage i toplote u vlažnom materijalu | 15 |
| 1.2. Kinetika konvektivnog sušenja vlažnih materijala | 17 |
| 1.2.1. Vreme sušenja | 21 |
| 1.2.2. Prenos mase pri sušenju | 22 |
| 1.3. Klasifikacija osnovnih postupaka sušenja | 23 |
| | |
| 2. KONVEKTIVNE PNEUMATSKE SUŠARE I PREGLED STANJA LITERATURE | 25 |
| 2.1. Osnovne karakteristike, primena i konstrukciona rešenja | 25 |
| 2.2. Osnovne termotehničke zavisnosti i osobine konvektivne pneumatske sušare | 28 |
| 2.3. Pregled saznanja iz raspoložive literature o konvektivnom sušenju | 30 |
| 2.4. Pregled istraživanja u pogledu racionalizacije konvektivnog sušenja | 33 |
| 2.4.1. Racionalno korišćenje energije u konvektivnim sušarama | 36 |
| | |
| 3. OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA SA REZULTATIMA MERENJA | 40 |
| 3.1. Tehnološko-tehnički opis konvektivne pneumatske sušare | 43 |
| 3.2. Merne veličine i kontrolno merni pribor | 44 |
| 3.3. Rezultati merenja | 46 |
| | |
| 4. MODELI KRIVIH KINETIKE SUŠENJA I NUMERIČKI POKAZATELJI | 48 |

| | |
|---|------------|
| 4.1. Određivanje krivih kinetike sušenja i fenomenoloških - empirijskih jednačina | 49 |
| 4.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 50 |
| 5. ENERGETSKI BILANS KONVEKTIVNE PNEUMATSKE SUŠARE I NUMERIČKI POKAZATELJI | 58 |
| 5.1. Određivanje energetskog bilansa, specifične potrošnje energije i termičkog stepena iskorišćenja | 59 |
| 5.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 61 |
| 5.3. Energetski bilans pri povećanju kapaciteta sušare | 63 |
| 6. KOEFICIJENTI I MODELI PRENOSA TOPLOTE SA NUMERIČKIM POKAZATELJIMA | 68 |
| 6.1. Određivanje ukupnog koeficijenta prenosa toplote (k_u) | 69 |
| 6.1.1. Određivanje koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (α) i modeli prenosa toplote | 72 |
| 6.1.2. Određivanje koeficijenta prelaza toplote (k_i) | 75 |
| 6.1.3. Koeficijenti prenosa toplote od kondukcije i zračenja ($k_p + k_r$) | 76 |
| 6.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 78 |
| 7. NUMERIČKI POKAZATELJI REŽIMA SUŠENJA | 93 |
| 7.1. Parametri režima sušenja | 93 |
| 7.2. Optimalni režim sušenja | 94 |
| ZAKLJUČAK | 96 |
| SPISAK OZNAKA | 101 |
| LITERATURA | 103 |

PREDGOVOR

U okviru ove disertacije razmatrana je problematika konvektivnog sušenja. Disertacija je nastala kao rezultat eksperimentalnih i teorijskih istraživanja na realnom industrijskom postrojenju konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala.

Ovom prilikom želim da izrazim svoju zahvalnost Prof. dr Dragiši Tolmaču, vanrednom profesoru Tehničkog fakulteta "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, na pomoći pri definisanju teze i mnogobrojnim korisnim diskusijama i sugestijama pri obradi rezultata i pisanju ove disertacije.

Zahvaljujem se i sledećim organizacijama koje su mi pružile pomoć u eksperimentalnom i materijalnom obezbeđenju:

- A.D. "IPOK" Industrija prerađevuna od kukuruza - Zrenjanin,
- Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin" - Zrenjanin.

Takođe se zahvaljujem Prof. dr Miroslavu Lambiću i Prof. dr Živoslavu Adamoviću, redovnim profesorima Tehničkog fakulteta "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, na dosadašnjoj saradnji.

Moj višegodišnji rad i interesovanje na problematici vezanoj za procesno mašinstvo i tehnologiju održavanja rezultovao je određenim brojem rešenja i konstrukcija. Rezultate ovih radova, koristila sam pri izradi ove disertacije, a jednim delom sam ih i publikovala u naučno stručnim časopisima i zbornicima radova nacionalnog značaja:

1. Naučno stručnim časopisima:

- Procesna Tehnika, SMEITS, Beograd.
- "OMO" Održavanje Mašina i Opreme, Beograd.
- "KGH" Klimatizacija Grejanje Hlađenje, SMEITS, Beograd, i dr.

2. Zbornicima radova naučno stručnih skupova i kongresa:

- Međunarodni naučno stručni skup "Transport u Industriji", Mašinski fakultet, Beograd.
- Naučno stručni skup o opremi u prcesnoj industriji "PROCESING", SMEITS, Beograd.
- Naučno stručni skup "PTEP" - Prosesna tehnika i energetika u poljoprivredi, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, itd.

3. Pri izradi disertacije takođe sam koristila i rezultate istraživanja koji su proistekli iz moje magistarske teze, kao osnovu za nastavak istraživanja u okviru ove disertacije.

Mr Slavica Prvulović, dipl. inž.

Zrenjanin, 2004. god.

UVOD

Istraživanja na eksperimentalnim postrojenjima imaju veliki značaj, radi određivanja podataka potrebnih za postavljanje materijalnog i energetskog bilansa, kapaciteta sušare i dr.

U cilju projektovanja industrijskih sušara potrebno je raspolagati sa niz podataka o kinetici sušenja, režimu sušenja, koeficijentima prenosa toplote i dr. Iz tih razloga veliki značaj imaju istraživanja na eksperimentalnim industrijskim postrojenjima.

Procesi sušenja zastupljeni su u raznim granama industrije, kao npr. prehrambenoj industriji, agro industriji, hemijskoj industriji, u industriji građevinskih materijala, industriji celuloze i papira itd.

Konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala se koriste za sušenje rastresitih materijala sa koncentracijom $c_k=(0,05-2)$ kg materijala /kg vazduha. Srednje veličine čestica obično iznose $(0.05 - 2)$ mm. Brzina strujanja toplog agensa sušenja - zagrejanog vazduha iznosi $(10 - 30)$ m/s.

Sušenje je termički proces, pri čemu dolazi do oduzimanja vlage sušenom materijalu. Pri tome izdvajanje vlage iz sušenog materijala nastaje usled njenog isparavanja, izazvanog dovođenjem određene količine toplote.

Prema načinu dovođenja toplote sušenom materijalu, razlikuju se sledeće grupe sušenja:

- Konvektivno sušenje: sušenje dodirrom, gasovitog agensa sušenja sa vlažnim materijalom, pri čemu se dovodi toplota vlažnom materijalu procesom konvekcije.
- Kontaktno sušenje: sušenje u direktnom kontaktu, vlažnog materijala sa zagrejanom površinom.
- Radijaciono sušenje: sušenom materijalu, toplota se dovodi zračenjem (infra crvenim zracima) i dr metode sušenja.

Sušenje ima za cilj da: smanji masu proizvoda, sačuva prirodne osobine materijala, poveća stabilnost proizvoda pri skladištenju ili konzerviranju.

U procesu sušenja dolazi do istovremenog prenosa toplote i mase - toplota se dovodi materijalu da bi isparila vlaga, a masa se prenosi kroz materijal kao tečnost ili para, i odvodi agensima za sušenje (zagrejanim vazduhom ili drugim gasovima).

Konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala odlikuju se vrlo kratkim vremenom sušenja npr. $\tau = (1 - 3)$ s. Iz tih razloga na ovim sistemima se mogu sušiti proizvodi osetljivi na toplotu, npr. U prehrambenoj industriji, agroindustriji i sl. To mogu biti proizvodi koji bolje podnose visoke temperature u kratkom vremenskom periodu, nego niže temperature u dužem vremenskom periodu.

Ove sušare u odnosu na druge sistem sušenja imaju relativno jednostavnu konstrukciju (predajnik toplote, cev sušare, cikloni, ventilatori i dr.). Iz tih razloga održavanje i servisiranje su relativno jednostavni. Za ove sušare postoji vrlo malo kvalitativnih i kvantitativnih podataka u cilju izvođenja proračuna, uključujući tu i koeficijente prenosa toplote. Iz tih razloga veliki značaj imaju istraživanja sprovedena na realnim industrijskim postrojenjima za određene vrste sušenog materijala. Konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala su sastavni deo opreme u fabrikama za industrijsku preradu žitarica npr. kukuruza, tehnologijom tzv. mokre prerade.

Usavršavanje ovih sistema sušenja ima za cilj porast efikasnosti tj. sniženje energetske i investicione troškova. Na osnovu toga predmet istraživanja su konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala. U okviru disertacije biće utvrđeno sledeće: modeli krivih kinetike sušenja, energetske bilansi, modeli prenosa toplote - kriterijalne jednačine, koeficijenti prenosa toplote, optimalni režim sušenja i njihovi numerički pokazatelji.

Pri izradi disertacije korišćeni su rezultati istraživanja, koji su proistekli iz moje magistarske teze [40], tako da materija izneta u okviru ove disertacije predstavlja nastavak istraživanja započet u magistarskoj tezi.

I. PREDMET ISTRAŽIVANJA

U okviru disertacije prapredviđena su eksperimentalna i teorijska istraživanja na realnom industrijskom postrojenju konvektivne pneumatske sušare, u cilju određivanja modela i numeričkih pokazatelja prenosa toplote, energetske karakteristika - bilansa, optimalnog režima sušenja, njihove analize i određivanja koeficijanata prenosa toplote.

Konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala su uređaji koji se koriste u fabrikama za industrijsku preradu žitarica, pri sušenju praškastih i sitnozrnastih materijala. Prenos toplote ostvaruje se konvekcijom, zahvaljujući principu sušenja na bazi direktnog kontakta zagrejanog vazduha i vlažnog materijala. Pri tome se ostvaruje intenzivna razmena toplote i mase.

Osnovni zahtev koji sušara treba da ispuni u toku rada, je mogućnost uspostavljanja režima u različitim uslovima eksploatacije sušare. Pri tome osnovni parametri procesa sušenja (temperatura, vreme sušenja i dr.), zavise od tehnologije vođenja procesa. Na osnovu rezultata eksperimentalnih merenja i istraživanja, biće određeni relevantni parametri procesa konvektivnog sušenja, kao što su: numerički pokazatelji prenosa toplote - fenomenološke jednačine krivih kinetike sušenja, koeficijanata prenosa toplote, kriterijalne jednačine prenosa toplote i dr.

II. CILJ ISTRAŽIVANJA

U disertaciji se planira teorijsko i eksperimentalno istraživanje procesa konvektivnog sušenja materijala poznatih karakteristika, u cilju utvrđivanja: modela i mehanizma prenosa toplote, numeričkih pokazatelja, modela krivih kinetike sušenja i odgovarajućih fenomenoloških jednačina, energetskog bilansa i numeričkih vrednosti koeficijanata prenosa toplote, optimalnog režima sušenja i modela kriterijalnih jednačina prenosa toplote.

Obzirom da za konvektivne pneumatske sušare postoji vrlo malo kvalitativnih i kvantitativnih podataka za proračun, uključujući i koeficijente prenosa toplote, [3], [11],[14],[17], kao i da se izbor konvektivnih sušara vrši po približnoj metodi sastavljanja energetskog bilansa, cilj istraživanja je određivanje modela prenosa toplote i utvrđivanje numeričkih pokazatelja - energetskih parametara koji su merodavni pri projektovanju i rekonstrukciji postrojenja za sušenje, kao što su npr. koeficijenti prenosa toplote, specifična potrošnja energije, toplotna snaga sušenja i dr.

Na postojećim konvektivnim pneumatskim sušarama u industrijskim pogonima često puta je potrebno povećati kapacitet sušare, što zahteva znatna investiciona sredstva. U tom cilju biće utvrđen energetski bilans, kao i optimalna rešenja.

Obzirom da su procesi sušenja složeni energetski procesi, i da se pri konvektivnom sušenju troše znatne količine toplote, cilj i zadaci istraživanja su određivanje energetskih bilansa pri optimalnom režimu sušenja i minimalnoj specifičnoj potrošnji energije.

III. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

Prema literaturnim izvorima [17], [18], [63], [92], koeficijent prenosa toplote pri konvektivnom sušenju, specifična potrošnja energije i drugi relevantni parametri procesa kreću se u širokim granicama, što projektantima sistema ne omogućava precizan proračun. Iz tih razloga potrebna su dalja istraživanja na realnim industrijskim postrojenjima.

Rezultati istraživanja treba da ukažu na mogućnost primene podataka, što u perspektivi treba da omogući njihovo korišćenje pri projektovanju i razvoju novih konvektivnih sušara sa pneumatskim transportom materijala. Izvršiće se kvalitativna analiza uslova i uticaja pojedinih veličina koje dominantno utiču na proces sušenja. Rezultati istraživanja imaće upotrebnu vrednost, jer će se bazirati na proverenim eksperimentalnim podacima sa realnog industrijskog postrojenja konvektivne sušare. Na osnovu eksperimentalnih i teorijskih istraživanja očekuju se kvalitativne i kvantitativne numeričke vrednosti rezultata relevantnih energetskih parametara sušenja.

U cilju matematičkog opisivanja složenih mehanizama prenosa toplote u procesu sušenja očekuju se rezultati u vidu kriterijalnih jednačina Nuseltovog tipa, npr. $Nu = K Re^a$. U cilju utvrđivanja energetskog bilansa pri povećanju kapaciteta sušare, predpostavlja se da će najoptimalnije rešenje za povećanje kapaciteta sušare, biti povećanje visine - dužine cevi sušare i produženje vremena sušenja.

U cilju racionalizacije potrošnje energije, predpostavka je da će se ona ostvariti pri optimalnom režimu sušenja - (minimalna specifična potrošnja energije, dobar kvalitet osušenog materijala, optimalni kapacitet sušenja).

1. IZVOD IZ TEORIJE PROCESA SUŠENJA

| | |
|---|----|
| 1.1. Statika procesa sušenja | 12 |
| 1.1.1. Vlažan materijal i ravnotežna vlažnost | 12 |
| 1.1.2. Potencijal prostiranja vlage | 15 |
| 1.1.3. Mehanizam prostiranja vlage i toplote u vlažnom materijalu | 15 |
| 1.2. Kinetika konvektivnog sušenja vlažnih materijala | 17 |
| 1.2.1. Vreme sušenja | 21 |
| 1.2.2. Prenos mase pri sušenju | 22 |
| 1.3. Klasifikacija osnovnih postupaka sušenja | 23 |

1. IZVOD IZ TEORIJE PROCESA SUŠENJA

Značajan doprinos u oblasti teorije sušenja ostvarili su autori prema lit. [11, 14, 15, 18, 31, 39, 45] . Vidne rezultate kao i doprinos razvoju tehnike sušenja dali su autori prema lit. [3, 17,19, 25, 55].

Sušenje kao složeni tehnološki proces ima za cilj da smanji masu gotovog proizvoda i očuva čitav niz prirodnih osobina materijala, i da te osobine koliko je moguće poboljša, kako bi krajnji proizvod bio što boljeg kvaliteta u pogledu fizičko-hemijskih i strukturno-mehaničkih pokazatelja.

Sušenjem se naziva proces izvlačenja tečnosti tj. vlage iz materijala, usled čega se povećava maseni udeo suve materije u njemu. Pošto se u praksi iz materijala uglavnom izvlači voda, pod sušenjem se obično podrazumeva proces obezvlaživanja (dehidracije) materijala.

Prema tome, sušenjem se postižu sledeći efekti:

- a) smanjuje masa proizvoda, a time i troškovi prevoza;
- b) povećava mehanička otpornost materijala (keramički delovi, drvo);
- c) povećava specifična toplota sagorevanja goriva;
- d) povećava stabilnost prehrambenih proizvoda i biopreparata pri skladištenju i konzervisanju.

Voda iz materijala se može odstraniti na dva principijelno potpuno različita načina:

1. bez promene njenog agregatnog stanja, a to se ostvaruje mehaničkim putem: (presovanjem, centrifugiranjem, filtriranjem), ili neposrednim dodirrom suvog i vlažnog materijala;
2. sa promenom njenog agregatnog stanja, pri tzv. toplotnom sušenju.

Pri opredeljivanju za način i režim sušenja (temperatura, brzina i relativna vlažnost agensa sušenja) potrebno je voditi računa, između ostalog, o uticaju pojedinih parametara režima sušenja na krajnje osobine materijala, kako bi finalni proizvod posedovao najbolja tehnološka svojstva.

Konstrukcija postrojenja za sušenje i tehnološki proces koji se odvija u njemu su međusobno povezani i uslovljeni. Postrojenje za sušenje treba da zadovolji čitav niz zahteva kao što su:

- a) dobijanje proizvoda visokog kvaliteta i u saglasnosti sa zahtevima koje postavljaju odgovarajući standard;
- b) visoki tehničko-ekonomski pokazatelji (što racionalnije iskorišćavanje zapremine postrojenja za sušenje, minimalni pogonski troškovi i troškovi održavanja, maksimalna mogućnost mehanizacije postrojenja za sušenje itd.);
- c) mogućnost automatskog regulisanja i vođenja procesa sušenja.

Uticaj parametara režima sušenja na dobijanje visokokvalitetnog proizvoda, uz što bolje tehničko-ekonomske pokazatelje postrojenja za sušenje, utvrđuje se obično eksperimentalnim putem na laboratorijskom ili realnom industrijskom postrojenju. Dobijeni rezultati se zatim uz niz korekcija primenjuju za proračun i konstrukciju, a i za eksploataciju realnih proizvodnih postrojenja.

I pored velikih napora, koji se nekoliko poslednjih decenija čine radi dobijanja podataka koji su merodavni pri projektovanju postrojenja za sušenje, može se reći da se i danas pojavljuju nedovoljno ekonomična rešenja. Jedan od razloga je u nedovoljnom poznavanju mehanizama prenosa toplote i mase u vlažnim materijalima, odnosno u

nepoznavanju merodavnih parametara koji treba da čine polaznu osnovu pri projektovanju, ostvarenju, vođenju i regulisanju procesa sušenja.

Velike teškoće izaziva međusobna uslovljenost procesa prenosa toplote i procesa prenosa mase u vlažnim materijalima. Takođe, vlažni materijali veoma često predstavljaju biološke sisteme koji su po svojoj prirodi koloidni, a po strukturi kapilarno-porozni, što pri analizi procesa sušenja izaziva dodatne teškoće.

Zbog toga je neophodno dalje istraživanje u ovoj oblasti i iznalaženje novih modela koji bi odgovarali stvarnom materijalu i realnim sistemima sušenja.

1.1. STATIKA PROCESA SUŠENJA

1.1.1. Vlažan materijal i ravnotežna vlažnost

Prema literaturi [15] i [45] svi vlažni materijali se mogu svrstati u tri grupe:

a) *Koloidna tela (elastični geli)*. U toku procesa sušenja ova tela znatno menjaju svoje dimenzije, ali zadržavaju elastične osobine (želatin).

b) *Kapilarno-porozna tela (krti geli)*. Pri sušenju ova tela zadržavaju svoje dimenzije ili ih neznatno menjaju. Materijal postaje krt i bez teškoća se može pretvoriti u prah (keramički materijali).

c) *Kapilarno-porozna koloidna tela*. Ova tela poseduju osobine kapilarno-poroznih i koloidnih tela. Pripadaju grupi vezanih disperznih sistema, pošto čestice disperzne faze obrazuju više ili manje krute prostorne strukture ili skelet. Ovakvi sistemi nazivaju se gelima. Zidovi kapilara ovakvih tela su elastični i pri upijanju tečnosti materijal bubri (koža, glina, zrna žitarica, tkanina itd.).

Uzimajući u obzir sile koje deluju na vlagu u materijalu, može se izvršiti i drugojačija podela materijala koji se izlažu procesu sušenja:

a) *Kapilarno-porozna tela*. U njima su takođe kapilarne sile znatno jače od sila teže.

b) *Porozna tela*. U njima su kapilarne sile znatno jače od sila teže. Najznačajniji parametar na osnovu kojeg se vrši klasifikacija veze vlage sa skeletom suvog materijala je rad koji je potrebno utrošiti za izotermno izvlačenje vlage iz materijala. Dakle, proces

izvlačenja vlage iz materijala povezan je sa kidanjem veza između vlage i skeleta suvog materijala, a za to je potrebno uložiti neku količinu energije. U zavisnosti od veličine potrebne energije razlikuju se sledeći oblici vezane vlage:

- a) hemijski vezana vlaga;
- b) fizičko-hemijski vezana vlaga;
- c) fizičko-mehanički vezana vlaga;

Masa **hemijski** vezane vlage u materijalu određena je stehiometrijskim odnosima, a nalazi se u obliku hidroksilnih jona i u obliku molekularnih jedinjenja (kristalohidrata). Veze ove vrste su izrazito jake i u toku uobičajenog procesa sušenja ne podležu kidanju.

Fizičko-hemijska vezana vlaga obuhvata adsorpciono i osmozno vezanu vlagu. Adsorpciono vezivanje vlage u koloidnim telima nastaje u prvoj fazi upijanja vode. Pri tome dolazi do kontrakcije sistema i oslobađanja toplote. Osmozno vezivanje vlage nastaje u drugoj fazi upijanja vode. Proces se odvija bez kontrakcije sistema i oslobađanja toplote. Osmozno vezivanje vlage nastaje u koloidnim telima koja su izgrađena od frakcija koje se rastvaraju u vodi i od frakcija koje su nerastvorljive u vodi. Osobine adsorpciono vezane vlage znatno se razlikuju od osobina slobodne vode. Ta razlika je najjače izražena u monomolekularnom sloju adsorpciono vezane vode i sa porastom broja slojeva postepeno se gubi. Masa osmozno vezane vlage je znatno veća od adsorpciono upijene vlage. Voda koja je vezana osmozno se po svojim osobinama ne razlikuje od slobodne vode.

Fizičko-mehanički vezana vlaga obuhvata: vlagu kvašenja (površinski upijena vlaga pri neposrednom dodiru vode sa površinom tela), strukturalnu vlagu (vlaga koja je vezana pri formiranju strukture tela) i kapilarnu vlagu koja se nalazi u makrokapilarima. Pri sušenju materijala najpre se izvlači fizičko-mehanički vezana vlaga i to vlaga kvašenja, a zatim kapilarna vlaga.

Prisustvo pojedinih vrsta vezane vlage u materijalu koji se suši može se utvrditi koristeći termoanalitičku metodu sušenja uzorka u ustaljenim uslovima.

Kada se vlažan materijal nalazi u kontaktu sa vlažnim vazduhom mogu se odvijati dva procesa:

- 1) Sušenje materijala (desorpcija vlage).

Ovo je slučaj kada je parcijalni pritisak pare na površini materijala veći od parcijalnog pritiska pare u vazduhu, ($p_H > p_B$) - vlaga iz materijala prelazi u vazduh.

- 2) Vlaženje materijala (apsorpcija vlage).

To je slučaj kad je parcijalni pritisak pare na površini materijala manji od parcijalnog pritiska pare u vazduhu, ($p_H < p_B$) - vlaga iz vazduha prelazi u materijal.

3) U procesu sušenja pritisak, p_H se smanjuje, tako da se izjednače vrednosti $p_H = p_B$. Pri tome dolazi do uspostavljanja dinamičke ravnoteže. Vlažnost koju materijal ima u stanju ravnoteže je ravnotežna vlažnost materijala.

Ravnotežna vlažnost zavisi od osobina materijala i od parcijalnog pritiska vodene pare nad materijalom ili proporcionalno tome od veličine odgovarajuće relativne vlažnosti vazduha.

Količina vode (vlage) koja se u cilju promene vlažnosti od w_1 na w_2 , (u procentu ukupne težine) odstrani sušenjem iznosi:

$$m_w = m \left(1 - \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \right) \quad [kg] \quad (1.1)$$

Ako je vlažnost materijala data u procentu suve materije w' onda je:

$$m_w = m_{SM} \frac{w'_1 - w'_2}{100} \quad [kg] \quad (1.2)$$

gde su:

m - masa vlažnog materijala, [kg];

m_w - masa vlage, [kg];

m_{SM} - masa suve materije, [kg];

w - vlažnost materijala u odnosu na ukupnu težinu, [%];

w' - vlažnost materijala u odnosu na suhu materiju, [%].

1.1.2. Potencijal prostiranja vlage

Pojam potencijala prostiranja materije (vlage) u vlažnom materijalu uveden je po analogiji sa temperaturom. Prema opštoj teoriji prostiranja toplote i materije, u koloidno-kapilarno-poroznim materijalima, lit. [15], potencijal prostiranja vlage u vlažnim materijalima je energija veze vlage i skeleta suvog materijala. U stanju termodinamičke i higrometrijske ravnoteže vlažnog materijala, ili sistema vlažan materijal-okolina, potencijal prostiranja materije u različitim delovima vlažnog materijala ili delovima sistema ima istu vrednost, pa između pojedinih delova sistema nema razmene materije.

Hemijski potencijal vlage u parnom stanju, koja se nalazi u vlažnom vazduhu, zavisi od apsolutne temperature T i parcijalnog pritiska vodene pare u vlažnom vazduhu $\mu_w=f(p_p,T)$ i može se izraziti na sledeći način:

$$\mu_w=R T \ln \Phi \quad (1.3)$$

Ovako određen hemijski potencijal bio bi ujedno i hemijski potencijal vlage u vlažnom materijalu, a on je po apsolutnoj veličini jednak energiji veze vlage sa skeletom suvog materijala:

$$-\mu_w= e = -R T \ln \Phi \quad (1.4)$$

Izraz se može primeniti za određivanje hemijskog potencijala adsorpciono, osmotski i kapilarno vezane vlage, ali pod uslovom da se vlažan materijal nalazi u higroskopnoj oblasti, gde je $R=8,314$ [kJ/mol K] - univerzalna gasna konstanta.

1.1.3. Mehanizam prostiranja vlage i toplote u vlažnom materijalu

Prostiranje vlage u materijalu nastaje usled postojanja gradijenta-potencijala, a vlaga se prenosi u obliku pare ili tečnosti iz zone materijala sa višim potencijalom prostiranja vlage do zone sa nižim potencijalom.

Smatra se da mehanizam prostiranja vlage u materijalu zavisi uglavnom od načina i oblika veze vlage sa skeletom materijala, strukture materijala, uslova uzajamnog termodinamičkog delovanja materijala i okoline i intenziteta fizioloških i biohemijskih procesa u materijalu. Tako, na primer, adsorpciono vezana vlaga u materijalu prostire se u obliku pare i to difuznim (molekularnim) putem. Potencijal prostiranja vlage u ovom slučaju je parcijalni pritisak vodene pare (p_p) u vlažnom materijalu, [14, 15, 45].

Na osnovu toga, potencijal prostiranja vlage u materijalu je veličina koja je predstavljena složenom funkcionalnom zavisnošću od parcijalnog pritiska vodene pare u materijalu, kapilarnog potencijala, osmotskog pritiska, koncentracije mareije u vodenom rastvoru, temperature, ukupnog pritiska, biološke aktivnosti u materijalu itd.

$$\Phi = \Phi(p_p, \psi, p_{os}, c, T, p, b, \dots) \quad (1.5)$$

Osnovni fenomenološki zakon prostiranja vlage u vlažnom materijalu dat je izrazom:

$$\vec{m}_{w_n} = -I_w \nabla \Phi = -I_w \frac{\partial \Phi}{\partial n} \vec{n}_0 \quad (1.6)$$

odnosno u skalarnom obliku:

$$\dot{m}_{w_n} = -I_w \frac{\partial \Phi}{\partial n} \quad (1.7)$$

gde su:

\dot{m}_{w_n} - materijalni fluks, masa količine vlage koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu ekvipotencijalne površine u pravcu normale na nju

$$\left[\dot{m}_{w_n} = dm_{w_n} (dt \cdot dA), \quad kgH_2O / (m^2 \cdot s) \right];$$

$\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ - skalarna veličina gradijenta potencijala prostiranja vlage u pravcu normale na ekvipotencijalnu površinu;

I_w - materijalna provodnost (provodnost vlage) u vlažnom materijalu.

Pošto vlaga pri svom prostiranju kroz vlažni materijal prenosi i svoju entalpiju, osnovni fenomenološki zakon prostiranja toplote u vlažnim materijalima ima oblik:

$$\dot{q} = -l \frac{\partial t}{\partial n} + \dot{m}_{w_n} i_w \quad (1.8)$$

gde su:

\dot{q}_n - rezultujući termički fluks kroz jedinicu izotermne površine u pravcu

normale na nju $\left[\dot{q}_n = dQ_n / (dt \cdot dA), \text{ W / m}^2 \right]$;

l - termička provodnost vlažnog materijala W/(mK);

$\frac{\partial t}{\partial n}$ - skalarna veličina gradijenta temperature u pravcu normale na izotermnu površinu;

\dot{m}_{w_n} - rezultujući materijalni fluks (fluks valge) kroz jedinicu izotermne površine u pravcu

normale na nju $\left[\dot{m}_{w_n} = dm_{w_n} / (dt \cdot dA), \text{ kgH}_2\text{O / (m}^2 \cdot \text{s)} \right]$;

i_w - specifična entalpija vlage, J/kg.

1.2. KINETIKA KONVEKTIVNOG SUŠENJA VLAŽNIH MATERIJALA

Pod sušenjem se podrazumeva proces dehidracije materijala pomoću agensa sušenja.

U toku procesa sušenja vlažan materijal teži stanju termodinamičke i higrometrijske ravnoteže sa agensom sušenja. Temperatura i vlažnost materijala, zavise dakle, od vremena i koordinata tela.

$$t = t(x, y, z, \tau) \quad (1.9)$$

$$w = w(x, y, z, \tau) \quad (1.10)$$

Zavisnosti 1.9 i 1.10 opisuju dinamiku zagrevanja i sušenja vlažnog materijala.

Ako se termička ravnoteža između vlažnog materijala i okoline uspostavlja mnogo brže od higrometrijske, zavisnost od koordinata tela ne mora da se uzme u obzir.

Pod kinetikom procesa sušenja, za razliku od dinamike, obično se podrazumevaju zavisnosti srednje vlažnosti (\bar{w}), srednje temperature (t) i srednje brzine sušenja ($-\partial\bar{w}/\partial t$) posmatranog vlažnog materijala od vremena (τ). Srednje vrednosti posmatranih fizičkih veličina se pri tome definišu preko sledećih izraza:

$$\bar{w} = \frac{1}{V} \int_V w \partial V; \quad \bar{t} = \frac{1}{V} \int_V t \partial V; \quad (1.11)$$

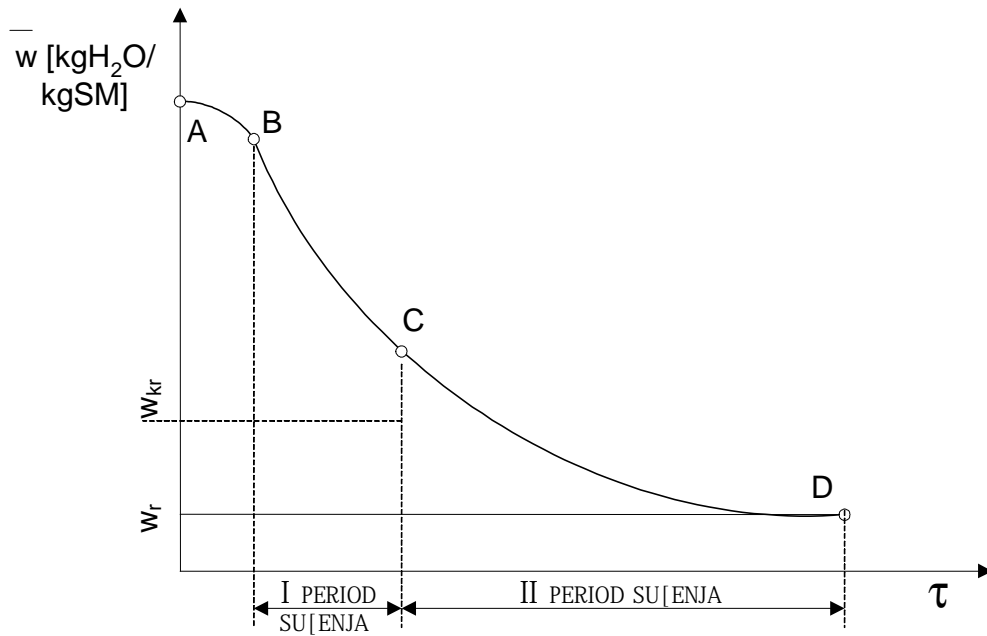
$$\frac{-\partial\bar{w}}{\partial t} = -\frac{1}{V} \int_V \frac{\partial w}{\partial t} \partial V$$

gde je V-zapremina.

Navedene zavisnosti jednačina krive sušenja vlažnog materijala $\bar{w} = f_1(t)$, jednačina temperaturne krive vlažnog materijala $\bar{t} = f_2(t)$ i jednačina brzine sušenja vlažnog materijala $(-\partial\bar{w}/\partial t) = f_3(t)$ najpotpunije, sa inženjerske tačke gledišta, definišu karakter odvijanja procesa sušenja, pošto njihovo poznavanje omogućuje da se u svakom trenutku odredi srednja vlažnost, srednja temperatura i srednja brzina sušenja vlažnog materijala, zatim odvedena količina vlage i dovedena količina toplote, i najzad, da se za zadatak krajnju vlažnost materijala odredi dužina trajanja procesa sušenja.

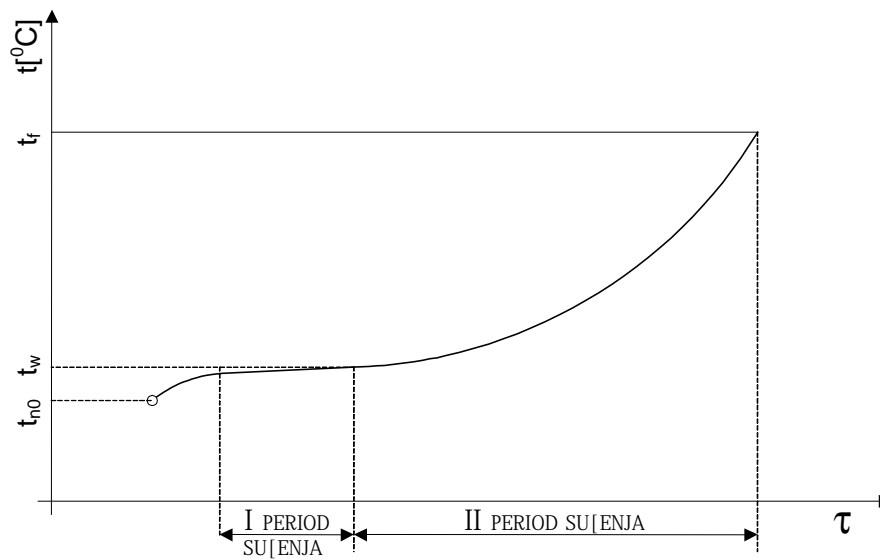
Na slici 1.1. predstavljen je klasičan izgled krive sušenja vlažnog materijala. U kratkom vremenskom intervalu, promena vlažnosti materijala je definisana odsečkom AB krive sušenja (odgovara početnom periodu zagrevanja vlažnog materijala). Zavisnost vlažnog materijala od vremena postaje zatim linearna (odsečak BC krive sušenja), a brzina sušenja ima stalnu vrednost (N). Taj period se naziva prvim periodom sušenja ili periodom stalne brzine sušenja, a tačka C prvom kritičnom tačkom. Vlažnost materijala koja odgovara toj tački naziva se prvom kritičnom vlažnošću materijala (w_{kr1}).

Daljim sušenjem vlažnog materijala, ispod kritične vlažnosti nastupa drugi period sušenja, odnosno period opadajuće brzine sušenja (deo CD krive sušenja). Pomoću krive sušenja može se odrediti vreme sušenja vlažnog materijala.



Slika 1.1. Kriva kinetike sušenja vlažnog materijala (kriva sušenja)

Na slici 1.2. data je temperaturna kriva sušenja vlažnog materijala.



Slika 1.2. Kriva kinetike sušenja vlažnog materijala (temperaturna kriva vlažnog materijala)

Brzina sušenja može se definisati kao količina vlage odvedena iz vlažnog materijala u jedinici vremena i po jedinici apsolutno suvog materijala $(-\partial \bar{w} / \partial t)$, kg H₂O/(kgSM s), ili kao količina vlage odvedena iz vlažnog materijala u jedinici vremena po jedinici površine sušenja:

$$N = \frac{m_{SM} d\bar{w}}{A \cdot dt} \quad [\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}] \quad (1.12)$$

Kriva brzine sušenja daje se obično u koordinatnom sistemu $-\partial \bar{w} / \partial t$, τ , ili još češće u sistemu $(-\partial \bar{w} / \partial t)$, \bar{w} slika 1.3.

Kriva brzine sušenja može se najlakše dobiti grafičkim diferenciranjem krive sušenja.

Objašnjenje za oblik krive brzine sušenja, koja je data na slici 1.3. bilo bi sledeće:

Na početku sušenja celokupna površina vlažnog materijala prekrivena je veoma tankim slojem vode koja ima iste osobine kao da je slobodna voda. Pri dodiru takve površine sa agensom sušenja nastaje proces isparavanja tečnosti. Brzina kojom vlaga isparava sa površine može se izraziti jednačinom:

$$N = \beta_w (p_H - p_B) \quad [\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2 \text{ s}] \quad (1.13)$$

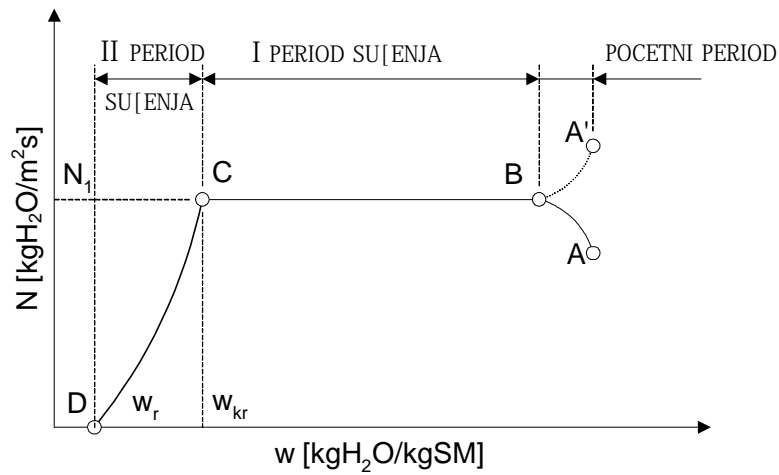
gde su:

β_w - koeficijent prenosa mase (vlage) sa površine vlažnog materijala u vazduh, [kg H₂O/m² s bar];

p_H - parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu neposredno iznad sloja vlage pri datoj temperaturi sloja [bar];

p_B - parcijalni pritisak pare u vazduhu na površini graničnog sloja [bar].

Parcijalni pritisak p_H , zavisi od temperature površinskog sloja vode.



Slika 1.3. Kriva brzine sušenja vlažnog materijala

1.2.1. Vreme sušenja

Određivanje ukupnog vremena sušenja materijala, zasnovano na poznavanju eksperimentalne krive brzine sušenja, zahteva poznavanje vrednosti konstante brzine sušenja, srednjeg, kritičnog i ravnotežnog sadržaja vlage. U tom slučaju vreme sušenja se određuje iz sledećih jednačina:

$$\tau_1 = \frac{1}{N_k} (W_1 - W_{kr}) \quad (1.14)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{N_k} (W_{kr} - W_r) \ln \frac{W_{kr} - W_r}{W_2 - W_r} \quad (1.15)$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (1.16)$$

gde su:

W_1 - Srednji sadržaj vlage u početku prvog perioda sušenja [kg H₂O/kg SM];

W_{kr} - Srednji sadržaj vlage u trenutku vremena τ , kritičan na početku perioda opadajuće brzine sušenja [kg H₂O/kg SM];

W_r - Srednji sadržaj vlage u trenutku vremena τ u stanju ravnoteže sa okolinom [kg H₂O/kg SM];

W_2 - Srednji sadržaj vlage do kojeg se materijal suši u vremenu opadajuće brzine sušenja i koji je u opštem slučaju veći od srednjeg ravnotežnog sadržaja vlage [kg H₂O/kg SM];

N_k - Konstanta brzine sušenja.

Prikazani metod proračuna vremena sušenja predložen je prema lit. [18] i on je najviše u upotrebi.

Ovim načinom najviše se uzimaju u obzir realni uslovi sušenja u drugom periodu pri promeni režima.

1.2.2. Prenos mase pri sušenju

Izraz (1.13) približno definiše pojavu prelaza materije sa površine vlažnog materijala u vazduh. On važi za stacionarni proces prelaza materije sa slobodne vodene površine u vazduh.

Prema lit. [12] za prvi period konvektivnog sušenja može se primeniti formula koja dovoljno tačno definiše pojavu prelaza materije sa površine vlažnog materijala.

$$r \beta_w (p_H - p_B) = \alpha (t_B - t_H) \quad [\text{kg/m}^2 \text{ h}] \quad (1.17)$$

gde su:

r - toplota isparavanja vode na temperaturi površine [J/kg];

α - koeficijent prelaza toplote između vazduha i površine vlažnog materijala [W/m² K];

t_B - temperatura vazduha [°C];

t_H - temperatura površine vlažnog materijala [°C].

β_w - koeficijent prenosa mase (vlage) sa površine vlažnog materijala u vazduh, [kg H₂O/m² s bar];

p_H - parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu neposredno iznad sloja vlage pri datoj temperaturi sloja [bar];

p_B - parcijalni pritisak pare u vazduhu na površini graničnog sloja [bar].

Međutim, proračunima i eksperimentima je pokazano da se koeficijent prenosa mase menja u zavisnosti od vlažnosti materijala i u toku drugog perioda konvektivnog sušenja, [14, 17].

1.3. KLASIFIKACIJA OSNOVNIH POSTUPAKA SUŠENJA

Da bi se pregledno pokazalo mesto toplotnog sušenja među ostalim postupcima oduzimanja vlage, razmotriće se klasifikacija principa i postupaka oduzimanja vlage (tabela 1.1.).

U tabeli 1.1. data je klasifikacija osnovnih postupaka toplotnog sušenja.

Tabela 1.1. *Klasifikacija osnovnih postupaka toplotnog sušenja.*

| Naziv postupka toplotnog sušenja | Izvor energije (toplotni izvor) | Osobine vlažnog materijala |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Konvektivno sušenje | Zagrejani gas (vazduh, produkti sagorevanja goriva, smeša vazduha i gasa. | Čvrsti materijali različitog oblika i strukture (zrnasti i praškasti materijali, viskozne paste i dr.). |
| Konduktivno sušenje | Zagrejane površine (ploče, valjci itd) koje dodiruje vlažan materijal. | Tanki listovi (hartija, tkanine itd.), viskozne paste, viskozne tečnosti (mleko, kvasac i dr.). |
| Sušenje pod uticajem energetskog polja | Izvori zračenja koji su zagrejani do visoke temperature. | Materijali male debljine (obojene metalne površine, hartija, testo i dr.). |
| Kombinovano konduktivno-konvektivno sušenje | Zagrejane površine i vazduh koji je apsorber vlage. | Tanki listovi materijala. |
| Kombinovano radijaciono-konvektivno sušenje | Izvori zračenja i vazduh koji je apsorber vlage. | Čvrsti materijali male i velike debljine. |

Klasifikacija postupaka sušenja i opšte karakteristike svakog postupka nameću i konstrukcionu podelu i izvođenje sušara. Tehnički postupci za ostvarivanje različitih principa

sušenja su brojni, a njihovo razmatranje i analiza se celishodno povezuje sa analizom i proučavanjem konstrukcija sušara i postrojenja za sušenje.

Najširu primenu ima toplotno sušenje u kome se vlaga u materijalu, na račun dovedene i oslobođene energije u telu, prevodi u parno stanje i u tom obliku odvodi iz materijala.

Toplotno sušenje čvrstih materijala ostvaruje se uglavnom isparavanjem; međutim, u nekim slučajevima - pri zagrevanju u električnom polju visoke frekvencije, temperatura materijala dostiže vrednost tačke ključanja vode, pa počinje isparavanje vode i u unutrašnjosti materijala. Pri tome, srednja kinetička energija svih molekula vode u telu, dostiže vrednost koja je dovoljna da se savladaju energije vezane u telu i otpori spoljašnje sredine u koju se odvodi stvorena para. Iz komore za sušenje, para se odvodi pomoću gasa u obliku vlažne smeše ili se odvodi pak u obliku čiste pare u kondenzator. Vlaga u materijalu može se prethodno i zamrznuti - pretvoriti u led, a zatim uz dovođenje energije spolja (toplota) vršiti sublimaciju leda.

2. KONVEKTIVNE PNEUMATSKE SUŠARE I PREGLED STANJA LITERATURE

| | |
|---|----|
| 2.1. Osnovne karakteristike, primena i konstrukciona rešenja | 25 |
| 2.2. Osnovne termotehničke zavisnosti i osobine konvektivne pneumatske sušare | 25 |
| 2.3. Pregled saznanja iz raspoložive literature o konvektivnom sušenju | 28 |
| 2.4. Pregled istraživanja u pogledu racionalizacije konvektivnog sušenja | 33 |
| 2.4.1. Racionalno korišćenje energije u konvektivnim sušarama | 36 |

2. KONVEKTIVNE PNEUMATSKE SUŠARE I PREGLED STANJA LITERATURE

Primena ovih sistema sušenja u industriji data je u radovima autora prema literaturi [3, 11, 14, 22, 26, 31].

Konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala zastupljene su u raznim tehnološkim procesima prehrambene i hemijske industrije.

2.1. Osnovne karakteristike, primena i konstrukciona rešenja

Konvektivne pneumatske sušare su posebni uređaji procesne tehnike u kojima se toplota neophodna za isparavanje vlage predaje sušenom materijalu putem neposrednog kontakta sa zagrejanim vazduhom ili gasom.

Na osnovu toga prenos toplote kod ovih sistema sušenja vrši se konvekcijom.

Konstrukciono izvođenje i dimenzije ovih sušara zavise od karakteristika sušenog materijala, kapaciteta sušenja, uslova prenosa toplote (direktno ili indirektno sušenje) i dr. U principu mogu se razlikovati dva tipa konstrukcionih rešenja konvektivnih pneumatskih sušara i to:

- a) Konvektivne pneumatske sušare sa direktnim i indirektnim sušenjem bez recirkulacije materijala.

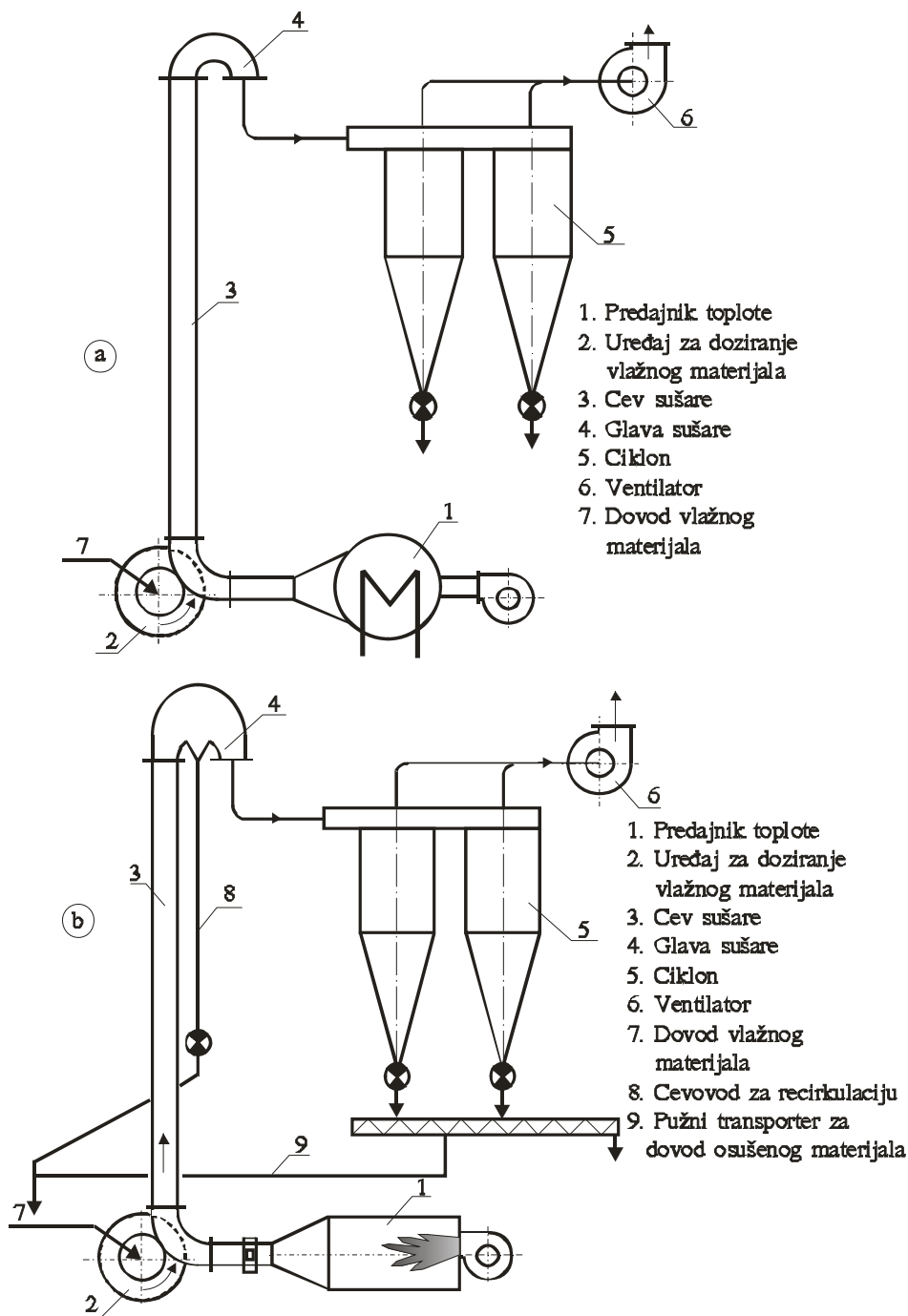
- b) Konvektivne pneumatske sušare sa direktnim i indirektnim sušenjem sa recirkulacijom sušenog materijala.

Na slici 2.1. prikazani su osnovni tipovi konvektivnih sušara sa pneumatskim transportom materijala.

U principu koriste se oba tipa konvektivne sušare date na slici 2.1. (a) i (b).

Na slici 2.1 a, prikazana je konvektivna sušara bez recirkulacije sušenog materijala, sa indirektnim zagrevanjem. Grejni fluid je obična vodena para ili prirodni gas, pa se pomoću razmenjivača toplote vrši zagrevanje vazduha - agensa sušenja. Dati sistem sušenja koristi se pri sušenju prehrambene robe ili semenske žitarice i sl.

Na slici 2.1 b, prikazana je konvektivna sušara sa recirkulacijom sušenog materijala i direktnim zagrevanjem - sušenjem. Kao gorivo obično se koristi prirodni gas, tako da sagoreli gas pomešan sa vazduhom vrši direktno sušenje materijala. Dati sistem sušenja koristi se pri sušenju robe i materijala koji neće služiti za ljudsku ishranu.



Slika 2.1. - Osnovni tipovi konvektivnih pneumatskih sušara; a - pneumatska sušara bez recirkulacije sušenog materijala; b - pneumatska sušara sa recirkulacijom sušenog materijala.

Na ovim sušarama vrši se kontinualno sušenje rastresitih materijala sa koncentracijom $c_k=0,05-2$ kg/kg. Srednja veličina čestica sušenog materijala može da iznosi 0,05-2 mm.

Brzina strujanja zagrejanog agensa sušenja (vazduha ili gasa) u sušari iznosi 10 - 30 m/s. Kostruciono izvođenje konvektivne sušare omogućuje pneumatski transport vlažnog materijala uz istovremeno sušenje. Zato nastaje pad pritiska prouzrokovan transportom materijala. Pri projektovanju pneumatske sušare potrebno je odrediti maseni protok suvog agensa sušenja, ukupnu količinu toplote, dimenzije cevi sušare. Na osnovu toga vrši se izbor ventilatora, ciklona, predajnika toplote i dr prema [3], [31].

Početna vlaga sušenog materijala može da iznosi $w_1 = 35 - 40$ %, a preostala vlaga nakon sušenja obično iznosi $w_2 = 10 - 15$ %. Pri tome specifična potrošnja energije kreće se u granicama 3900 - 5040 kJ/kgH₂O. Porošnja pare iznosi 1,80 - 2,40 kg pare/ kg H₂O, kod sistema indirektnog sušenja, a kod sistema direktnog sušenja potrošnja gasa iznosi: 0,120 - 0,160 m_n³ gasa/ kg H₂O, prema [22], [26]. Efikasnost ovih sušara procenjuje se prema termičkom stepenu iskorišćenja koji se kreće u granicama 0,66 - 0,74, u zavisnosti od sistema sušenja (indirektno ili direktno sušenje). Količina isparele vlage u pneumatskoj cevi sušare iznosi oko 400 kgH₂O/m³h, prema [11]. Vreme sušenja na ovim sušarama traje vrlo kratko svega nekoliko sekundi, pa se na njima mogu sušiti materijali koji dobro podnose visoke temperature u kratkom vremenskom periodu sušenja npr. $\tau= 1 - 3$ s.

Primena konvektivnih pneumatskih sušara zastupljena je naročito u prehrambenoj industriji u fabrikama za industrijsku preradu žitarica (prerada žita, kukuruza na principu mokrog postupka).

U principu ove sušare se mogu koristiti za sušenje brašnatih i sitnozrnih materijala. Jednostavna konstrukcija i relativno niska potrošnja energije omogućila je uspešnu primenu ovih sušara u navedenim granama industrije.

2.2. Osnovne termotehničke zavisnosti i osobine konvektivne pneumatske sušare

Na intenzite sušenja najviše utiče temperatura agensa sušenja. Intenzivnost procesa sušenja kod pneumatskih konvektivnih sušara zavisi od sledećih faktora: vlažnosti materijala, veličine čestica materijala, temperature agensa sušenja (toplog vazduha), vremena sušenja, brzine transpota materijala itd.

Obzirom da se na ovim sistemima suše brašnasti i zrnasti materijali, putem neposrednog kontakta sa zagrejanim vazduhom ili gasom (konvektivno sušenje), vrlo je teško ustanoviti zakon promene temperature površine sušenog materijala.

Za konvektivne pneumatske sušare postoji vrlo malo podataka koji omogućuju proračun [39], [49] uključujući koeficijente prenosa toplote. Za potrebe projektovanja ovih sušara neophodni su podaci sa eksperimentalnih postrojenja, obzirom da je vrlo teško matematički opisati zakonitosti prenosa toplote i mase kod ovih sušara.

Proračun osnovnih termotehničkih veličina i parametara moguće je izvršiti po metodi zasnovanoj na sastavljanju jednačine toplotnog bilansa konvektivne sušare prema [3], [49].

Iskorišćenje toplote u sušari tj. entalpijska razlika iznosi:

$$h = c_{pm} (t_1 - t_b) \left[\frac{kJ}{m_n^3} \right] \quad (2.1)$$

gde je:

t_1 - temperatura ulaznog vazduha u sušaru [$^{\circ}\text{C}$],

t_b - temperatura bridova [$^{\circ}\text{C}$],

c_{pm} - specifična toplota vazduha [kJ/m_n^3],

Količina toplote iznosi:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_w + \dot{Q}_s + \dot{Q}_p + \dot{Q}_z \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.2)$$

gde je:

\dot{Q}_w - toplota potrebna za isparavanje vode,

\dot{Q}_s - toplota potrebna za zagrevanje materijala,

\dot{Q}_p - toplota potrebna za zagrevanje vazduha koji ulazi u sušaru na mestima slabog zaptivanja,

\dot{Q}_z - gubici toplote od zračenja i provođenja.

Potrebna količina vazduha (agensa sušenja) je:

$$V_L = \frac{Q_w + Q_s + Q_p + Q_z}{h} \quad \left[\frac{\text{m}_n^3}{\text{h}} \right] \quad (2.3)$$

Gubici toplote sa izlaznim vazduhom:

$$\dot{Q}_L = V_L \cdot c_{pm} (t_b - t_L) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.4)$$

Ukupna količina toplote je:

$$\dot{Q}_U = \dot{Q}_w + \dot{Q}_s + \dot{Q}_p + \dot{Q}_z + \dot{Q}_L \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.5)$$

Specifična potrošnja energije iznosi:

$$q = \frac{\dot{Q}_U}{W} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgH}_2\text{O}} \right] \quad (2.6)$$

gde je:

W - količina isparele vode $\left[\frac{kg}{h} \right]$.

2.3. Pregled saznanja iz raspoložive literature o konvektivnom sušenju

U tabeli 2.1. dat je pregled saznanja o karakteristikama konvektivnih sušara u zavisnosti od vrste sušare i sušenog materijala.

U tabeli 2.2. dat je pregled osnovnih karakteristika sušara za skrob.

Na osnovu pregleda podataka u datim tabelama za konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala preostala vlaga nakon sušenja iznosi 12%, obzirom da je niže sadržaje vlage nemoguće postići zbog kratkog vremena sušenja tj. zadržavanja materijala u sušari. Za postizanje manjih sadržaja vlage npr. (2 ÷ 8) %, koriste se dobošaste rotacione sušare i spiralne sušare. Temperature sušenja kreću se u granicama od (105 ÷ 150) °C, specifična potrošnja energije kreće se u granicama od (3265 - 5828) kJ/kgH₂O, u zavisnosti od vrste sušenog materijala i tipa sušare.

Tabela 2.1. Pregled istraživanja i saznanja iz raspoložive literature o konvektivnom sušenju [3], [22], [26], [49].

| Vrsta sušare | Vlaga [%] | Termički stepen iskorišćenja h _T [-] | Specifična potrošnja energije q[kJ/kgH ₂ O] | Vrsta sušenog materijala |
|----------------------------|-----------|---|--|--------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Pneumatska sušara | 38 - 12 | 0,69 | 4092 | Pšenični skrob |
| Spiralna sušara | 40 - 8 | - | 3265 | Skrobni derivati |
| Spiralna sušara | 20 - 6 | - | 3685 | Krompirov skrob |
| Pneumatska sušara | 34 - 12 | 0,68 | 4187 | Kukuruzni skrob |
| Dobošasta rotaciona sušara | 13 - 8,5 | 0,58 | 5828 | Monohidrat glukoze |
| Rotaciona cevna sušara | 55 - 2 | - | 3980 | Kukuruzna klica |
| Pneumatska sušara | 58 - 12 | 0,70 | 5040 | Gluten |

Na osnovu literaturnih izvora [3,11,81], za sisteme konvektivnog sušenja, specifična potrošnja energije kreće se u relativno širokim granicama. Tako npr. za konvektivno sušare sa direktnim sušenjem proizvoda iz žitarica, cpecifična potrošnja energije iznosi: 0.158 (m³

2. Konvektivne pneumatske sušare i pregled stanja literature

prirodnog gasa/kg H₂O). Za sušare sa indirektnim sušenjem, specifična potrošnja vodene pare p= 8 bar, iznosi: 1.40 - 1.94 (kg vodene pare/kg H₂O). Pri sušenju šećera na principu konvekcije, specifična potrošnja vodene pare p= 4 bar, kreće se u granicama: 2.05 - 2.84 (kg vodene pare/kg H₂O), itd. U tabeli 2.2. dat je pregled istraživanja prema lit. [3,40,63], za konvektivne spiralne sušare, za sušenje skroba.

Tabela 2.2. Karakteristike spiralne sušare za skrob.

| Proizvod | Vlažnost suš. materijala w_1/w_2 [%] | Temperatura sušenja [°C] | Koeficijent prenosa toplote [W/m ² K] | Specifična potrošnja energije [kJ/kgH ₂ O] |
|------------------|--|--------------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kukuruzni skrob | 36/12 | 105 | 310 | 3056 |
| Krompirov skrob | 20/6 | 135 | 320 | 3685 |
| Kukuruzni skrob | 14/2 | 165 | 250 | 4229 |
| Skrobni derivati | 40/8 | 148 | 290 | 3262 |

Na osnovu istraživanja prema lit. [40, 124], na konvektivnoj sušari sa pneumatskim transportom materijala dobijenu su rezultati dati u tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Rezultati istraživanja na konvektivnoj sušari sa pneumatskim transportom materijala (prečnik cevi $D = 0,625$ m ; visina cevi $H = 21$ m.).

| Red. Br. | Energetski parametri sušenja | Oznaka i jed. mere | Vrednosti parametara |
|----------|--|---------------------------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Temperatura ulaznog vazduha u sušaru | t_1 [°C] | 425 |
| 2 | Količina isparele vode | W[kg/h] | 2030 |
| 3 | Ukupna količina toplote | \dot{Q}_u [kJ/h] | 7920000 |
| 4 | Toplotna snaga sušenja | Q_u [kW] | 2200 |
| 5 | Specifična potrošnja energije | q [kJ/kgH ₂ O] | 3900 |
| 6 | Količina vazduha za sušenje pri normalnim uslovima | V_L [m ³ /h] | 14350 |
| 7 | Specifična količina isparele vode | [kgH ₂ O/m ² h] | 50 |
| 8 | Koeficijent prenosa toplote | k [W/m ² K] | 340 |
| 9 | Temperatura bridova | t_b [°C] | 110 |
| 10 | Termički stepen iskorišćenja toplote | η_t [%] | 75 |

Osnovu za proračun i projektovanje industrijskih sušara predstavljaju podaci o modelima kinetike sušenja, energetskim bilansima, modelima prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima i režimu sušenja. Postojeće teorijske zakonitosti koje opisuju ove fenomene i dosadašnji rezultati istraživanja pretežno su kvalitativnog karaktera i ne pružaju osnov za ekzaktan teorijski proračun sušara, [3,17,63,81]. Zbog toga su neophodna dalja istraživanja u ovoj oblasti i iznalaženje novih modela koji bi što realnije odgovarali stvarnim sistemima.

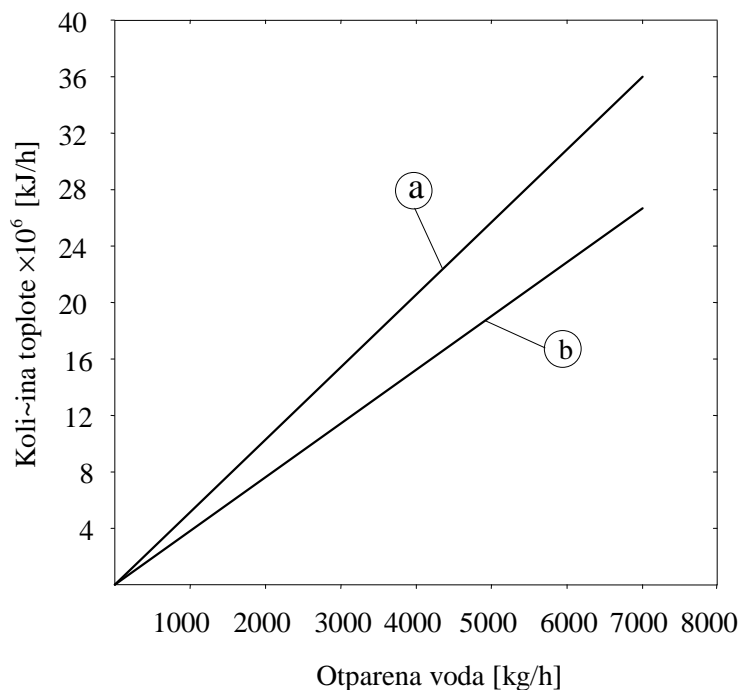
2.4. PREGLED ISTRAŽIVANJA U POGLEDU RACIONALIZACIJE KONVEKTIVNOG SUŠENJA

Potrošnja energije može biti presudan faktor pri izboru sistema sušenja.

Cilj svakog korisnika sušare je da optimizuje potrošnju energije, da bi smanjio troškove sušenja. U industriji se često koriste: konvektivne pneumatske sušare i konvektivno-kontaktne spiralne sušare. Uporedno su analizirani navedeni sistemi sušenja i izložen je niz podataka, korisnih za praksu, dobijenih ispitivanjem na oglednim i postojećim industrijskim sušarama [3, 22].

Potrošnja energije može biti presudan faktor pri izboru jednog od navedenih sistema sušenja.

Konvektivne sušare s pneumatskim transportom materijala mogu se izvoditi kao sušare sa direktnim grejanjem na gas, ili drugo gorivo, i sušare sa indirektnim grejanjem na paru, prema [3, 22]. Tako npr. sušare za skrob sa direktnim zagrevanjem imaju temperaturu vazduha na ulazu od oko 230°C i koeficijent iskorišćenja toplote od 74% (sl. 2.2).



Slika 2.2. - Potrebna toplota za direktno i indirektno grejanje sušare za skrob; a - indirektno grejanje na paru, b - direktno grejanje na gas.

Sušare sa indirektnim zagrevanjem imaju temperaturu vazduha na ulazu od oko 180°C i koeficijent iskorišćenja toplote od 66%.

U evropskim fabrikama skroba najčešće se koriste sušare sa indirektnim zagrevanjem, s obzirom da je u ovim sušarama manji rizik od eksplozije prašine skroba, nego u sušarama sa direktnim zagrevanjem. Prema [3], je šematski prikazana pneumatska sušara, sa izmenjivačem za rekuperaciju toplote. Toplota izlaznih gasova za predgrevanje svežeg vazduha se koristi pomoću specijalnog izmenjivača toplote-rekuperatora. Time se postiže bolji koeficijent iskorišćenja toplote u sušari. Od 1960. godine u industriji proizvodnje skroba počinju da se uvode kontaktne-konvektivne spiralne sušare, sa tankim slojem. Te sušare se koriste za sušenje skroba početnog sadržaja vlage od 40%.

U tabeli 2.4. su navedene vrste sušara i njihova primena u zavisnosti od početnog i preostalog sadržaja vlage.

Tabela 2.4. Vrste konvektivnih sušara i njihova primena za određene vrste materijala.

| Proizvod | Početna vlaga [%] | Preostala vlaga [%] | Vrsta sušare | |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------|----------|
| | | | pneumatska | spiralna |
| Nativni vlažni skrobovi i derivati | 33 - 40 | 12 - 20 | x | x |
| Komercijalno raspoloživ skrob | 12 - 20 | 3 - 10 | x | x |
| Derivati skroba i dekstrini | 12 - 20 | 1 - 2 | x | x |
| Skrob za kalupe | 6 - 9 | 3 - 6 | x | x |
| Nusproizvodi skroba | 40 - 70 | 10 - 18 | x | x |

Navedene vrste sušara imaju svoje posebne karakteristike kao što su: zavisnost od okolne vlage, temperatura ulaznog vazduha, tačka rošenja, temperatura proizvoda na ulazu i izlazu iz sušare, početni i preostali sadržaj vlage. U pneumatskim sušarama skroba temperatura ulaznog vazduha ograničena je na 140 - 180°C, u zavisnosti od vrste skroba.

Vreme zadržavanja materijala u pneumatskoj sušari je veoma kratko, pa je, između ostalog, teško postići niske sadržaje preostale vlage [22]. To može uticati tako da određeni proizvodi koji se moraju sušiti do niskih sadržaja vlage zahtevaju intenzivno grejanje, što dovodi do visoke temperature proizvoda-sušenog materijala na izlazu iz sušare. U svakom sistemu sušenja, prenos toplote i kretanje materijala određeni su fizičkim zakonima i specifičnim uslovima, koji mogu da variraju od jednog sistema do drugog, zbog različitih uslova prenosa toplote. U tabeli 2.5. su prikazani uporedni podaci za specifičnu potrošnju energije u pneumatskoj sušari i spiralnoj sušari na bazi sušenja kukuruznog skroba.

Tabela 2.5. Uporedni podaci za specifičnu potrošnju energije.

| Vrsta sušare | Spec. potrošnja energije u sušari | |
|-------------------|--|-------------------------|
| | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}(\text{otpar. vode})} \right]$ | |
| | bez izmenjivača toplote | sa izmenjivačem toplote |
| Pneumatska sušara | 4187 | 3559 |
| Spiralna sušara | 3056 | 2617 |

Podaci u tabeli 2.5. zasnovani su na sledećim parametrima [22].

- ulazna temperatura proizvoda: 30°C
- prosečna temperatura okoline: 10°C
- prosečni kapacitet: 7500 kg/h
- početna vlaga: 33%
- preostala vlaga: 12%
- otparena voda: 2350 kg/h.

U osnovi se koriste oba navedena sistema sušenja, jer su vrlo sigurni i pouzdani. Izbor određenog sistema sušenja ne zavisi samo od investicionih troškova i ekonomičnosti, već i od drugih faktora kao što je raspoloživa energija u odgovarajućem obliku.

2.4.1. Racionalno korišćenje energije u konvektivnim sušarama

Energija predstavlja važnu stavku u ceni proizvoda. Rekuperacija otpadne toplote utiče na smanjenje troškova proizvodnje. Proces toplotnog sušenja podrazumeva trošenje energije. Iz toga proizilazi da postoji velika potreba za smanjenjem troškova energije, koji su deo ukupnih troškova.

Sistem racionalizacije sastoji se u rekuperaciji otpadne toplote iz sušare i njenog korišćenja za grejanje i provetravanje pogona ili povećanje termičkog stepena iskorišćenja sušare, Š43,47Ć.

Ušteda energije može se postići ugradnjom razmenjivača toplote - rekuperatora i razmatrana je prema lit.[3, 44, 47]. Smanjenje toplotnih gubitaka zahteva promenu toplotno - tehnološkog projektnog rešenja, što se može pozitivno neutralisati odgovarajućim smanjenjem potrošnje goriva.

Jedan od odlučujućih faktora primene metode smanjenja toplotnih gubitaka na izvedenim postrojenjima je konkretna lokacija i opšte termoenergetsko stanje proizvodne celine u kojoj se sušara nalazi.

Obrada problema i proračun uštede energije vrši se uz pomoć h - x dijagrama (slika 2.3.). To je moguće, kada se radi o postojećim sušarama sa poznatim parametrima sušenja. Koriste se sledeći parametri:

t_1 - temperatura okoline, [°C],

t_2 - temperatura zagrevanja vazduha za sušenje, [°C],

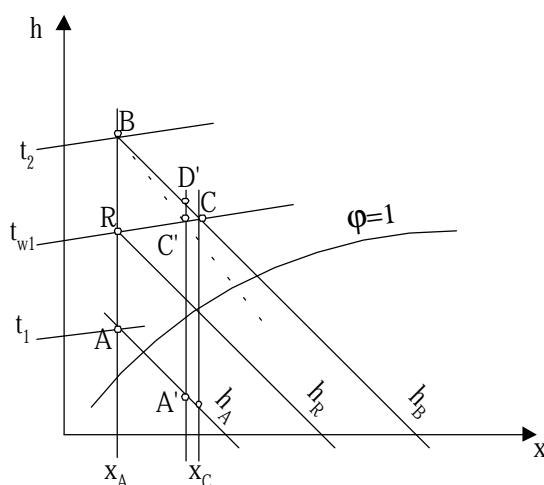
t_{w1} - temperatura izlaznih bridova iz sušare, [°C],

X_A - apsolutna vlažnost vazduha na temperaturi t_1 , [g/kg],

X_C - apsolutna vlažnost vazduha na temperaturi t_{w1} , [g/kg],

h_A, h_R, h_B - entalpije vlažnog vazduha na odgovarajućim temperaturama, prema sl.2.3. [kJ/kg],

W - količina isparele vode u sušari, [kg/h],



Slika 2.3. - Dijagram procesa sušenja

Znatne energetske uštede mogu se postići ukoliko se iskoriste topli bridovi za zagrevanje svežeg vazduha, a tako zagrejan vazduh odvodi: u kanal za grejanje i provetravanje industrijskih pogona, ili na ulaz u ventilator gorionika, prema Š26,44, 127Ć.

Povećanje sadržaja vlage po 1 kg vazduha iznosi:

$$\Delta x = x_C - x_A \quad (\text{g/kg}) \quad (2.7)$$

Potrebna količina toplote je:

$$\Delta h = h_B - h_A \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.8)$$

Specifična potrebna količina vazduha po 1 kg isparele vode iznosi:

$$q_0 = \Delta h \frac{1000}{\Delta x} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.9)$$

Energija za rekuperaciju po 1 kg isparele vode iznosi:

$$q_R = \frac{h_R - h_A}{h_B - h_A} q_0 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.10)$$

Ukupna količina toplote za rekuperaciju iznosi:

$$Q_R = q_R \cdot W \quad (\text{kJ/h}) \quad (2.11)$$

Ugradnjom razmenjivača toplote - rekuperatora na pneumatskim sušarama, povećava se termički stepen iskorišćenja postrojenja sušare za oko 15%, a smanjuje se specifična potrošnja energije, prema [2] i [3], što je dato u tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Termički stepen iskorišćenja bez rekuperacije i sa rekuperacijom otpadne toplote.

| Vrsta sušare | Vlaga % | Temp. step. iskorišć. | | Spec. potr. energ. | |
|------------------------------|---------|-----------------------|-------------|--------------------------|------|
| | | bez rekuper. | sa rekuper. | (kJ/kg H ₂ O) | |
| Pneumatska sušara za mekinje | 62 - 14 | 0.74 | 0.85 | 3930 | 3380 |
| Pneumatska sušara za skrob | 36 - 14 | 0.68 | 0.81 | 3890 | 3270 |

**3. OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA SA
REZULTATIMA MERENJA**

| | |
|---|----|
| 3.1. Tehnološko-tehnički opis konvektivne pneumatske sušare | 43 |
| 3.2. Merne veličine i kontrolno merni pribor | 44 |
| 3.3. Rezultati merenja | 46 |

**3. OPIS EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA SA REZULTATIMA
MERENJA**

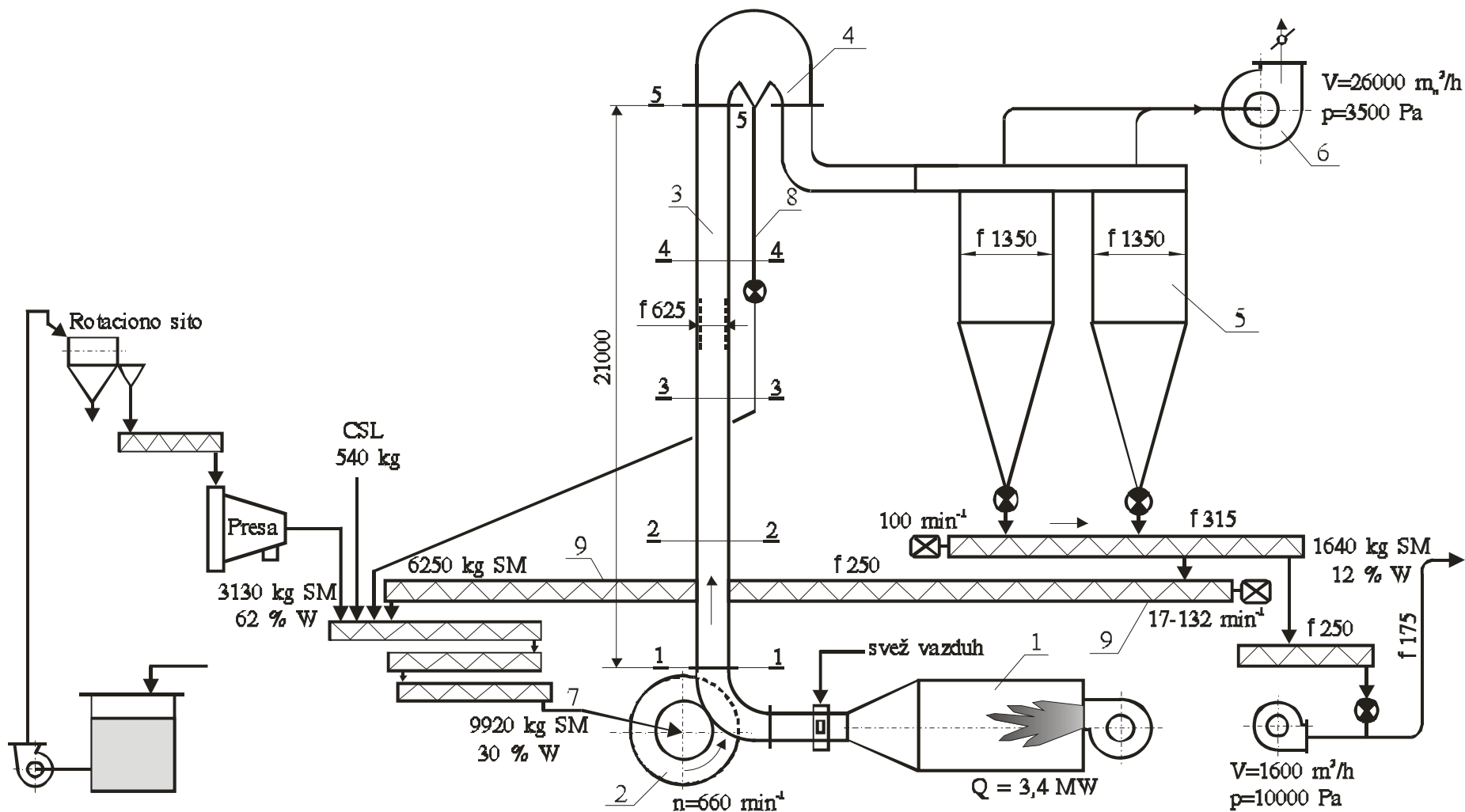
Eksperimentalna ispitivanja izvođena su na konvektivnoj sušari sa pneumatskim transportom materijala. Ispitivanja tj istraživanja su provedena na konkretnom postrojenju sušare u industrijskim proizvodnim uslovima.

Tehnološka šema eksperimentalnog postrojenja data je na slici 3.1.

U tabeli 3.1. date su osnovne karakteristike konvektivne pneumatske sušare.

Tabela 3.1. Osnovne karakteristike konvektivne pneumatske sušare.

| Red. Br. | Poz. | Naziv i karakteristike |
|----------|------|--|
| 1 | 1 | Gorionik sušare tip Saacke SG sa gasnim gorionikom $H_d = 32000 \text{ kJ/m}^3$, toplotne snage $Q = 3,40 \text{ MW}$. |
| 2 | 3 | Pneumatska cev sušare prečnika $D = 625 \text{ mm}$ i visine $H = 21 \text{ m}$. Položaj mernog mesta na pneumatskoj cevi sušare je: Presek (1-1) $h_1 = 0$ Presek (2-2) $h_2 = 5,25 \text{ m}$ Presek (3-3) $h_3 = 10,50 \text{ m}$ Presek (4-4) $h_4 = 15,75 \text{ m}$ Presek (5-5) $h_5 = 21 \text{ m}$. |
| 3 | 5 | Ciklonski separatori prečnika $D_c = 1350 \text{ mm}$. Visina cilindričnog dela cklona je 1920 mm , a visina konusnog dela cilindra je 3350 mm . |
| 4 | 6 | Centrifugalni ventilator sledećih karakteristika: $V = 26000 \text{ m}_n^3/\text{h}$, $\Delta p = 3500 \text{ Pa}$, $N = 75 \text{ kW}$. |
| 5 | 7 | Rotacioni dodavač vlažnog materijala instalisane snage $N = 18,5 \text{ kW}$ i br. obrtaja $n = 660 \text{ min}^{-1}$. |
| 6 | 4 | Glava sušare |



Slika 3.1. - Šema eksperimentalnog postrojenja konvektivne pneumatske sušare; 1-gasni gorionik, 2-uređaj za doziranje vlažnog materijala, 3-cev sušare, 4-glava sušare, 5-cikloni, 6-ventilator, 7-dovod vlažnog materijala, 8-cevovod za recirkulaciju-povratak nedosušenog materijala, 9-pužni transporter za dovod osušenog materijala, preseći (1, 2, 3, 4, 5) -merna mesta; **OZNAKE:** SM - suva materija; CSL - kornstip likvor (kukuruzni ekstrakt); W% - vlažnost; $V(m^3/h)$ - količina vazduha.

3.1. Tehnološko-tehnički opis konvektivne pneumatske sušare

Zagrevanje agenasa sušenja vrši se pomoću gasnog gorionika (1). Sušenje se obavlja u direktnom kontaktu toplih gasova sa vlažnim materijalom. Na osnovu toga ovde je zastupljen princip direktnog sušenja.

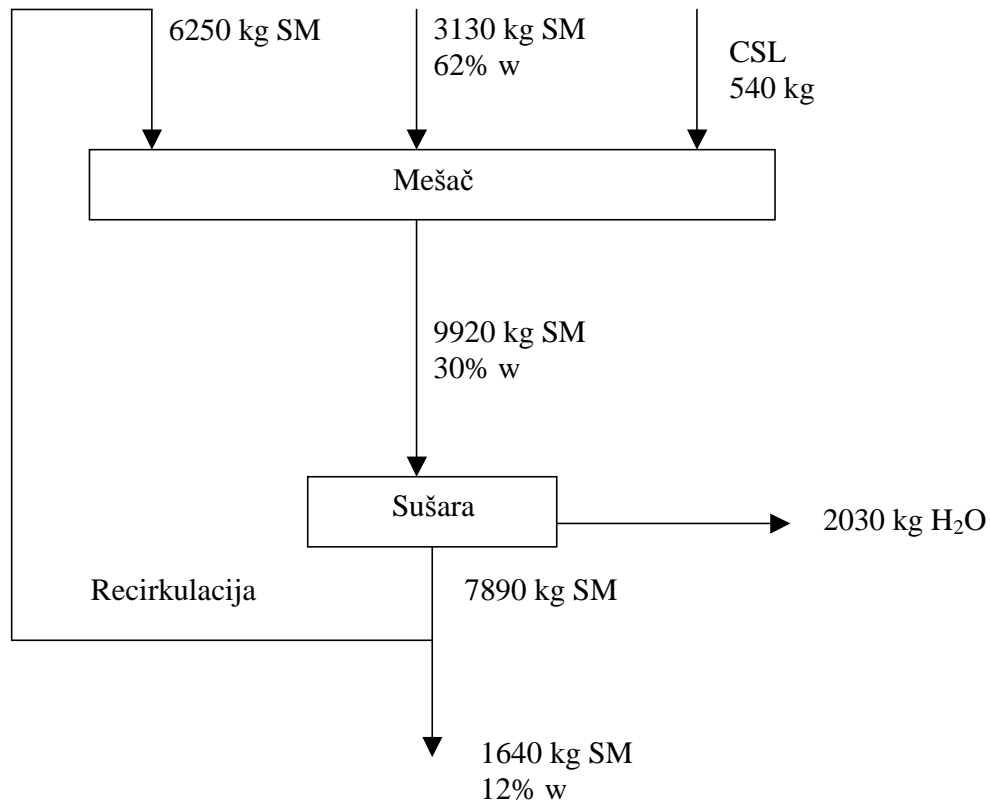
Doziranje vlažnog materijala u sušaru vrši se pomoću rotacionog dozatora (2), uz pomoć sistema pužnih transportera, kako je to dato na šemi eksperimentalnog postrojenja na slici 3.1. Pužni transporteri imaju ulogu mešaja vlažnog materijala sa osušenim materijalom iz cevovoda za recirkulaciju (8) i dodatkom CSL -kornstip likvor (kukuruzni ekstrat). Na ovaj način dobija se jednorodan vlažni materijal na ulazu u sušaru.

Vlažan materijal transportuje se toplim vazduhom - agensom sušenja pomoću pneumatske cevi sušare (3), prelazi preko glave sušare (4) i odlazi u ciklonske separatore (5) gde se vrši separacija sušenog materijala, a topli bridovi odlaze uz pomoć ventilatora (6), u atmosferu. Nedosušeni materijal zbog većeg sadržaja vlage usled dejstva gravitacione sile pada u konusno dno glave sušare (4) i pomoću recirkulacionog cevovoda (8) se vraća na dosušivanje. Osušeni materijal se transportuje iz ciklona pomoć pužnih transportera i posebnom linijom, pneumatskog transporta do pogona skladišta materijala.

Na tehnološkoj šemi eksperimentalnog postrojenja (slika 3.1) dati su odgovarajući materijalni bilansi odnosno kapaciteti vezano za sušeni materijal. Dati materijalni bilans bazira se na kapacitetu dnevne prerade (za 24 časa) koja iznosi $280 \cdot 10^3$ kg/dan, kukuruznog zrna vlažnosti 15 %. Pri tome je utvrđena potrošnja gasa od $250 \text{ m}_n^3/\text{h}$.

Blok šema materijalnog bilansa sušare data je na slici 3.2.

3. Opis eksperimentalnog postrojenja sa rezultatima merenja



Slika 3.2. Blok šema materijalnog bilansa konvektivne pneumatske sušare, prema šemi eksperimentalnog postrojenja (slika 3.1)

3.2. Merne veličine i kontrolno merni pribor

1. Temperatura agensa sušenja - toplog vazduha merena je u presecima: 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, prema šemi eksperimentalnog postrojenja. Merenja su vršena digitalnim termometrom opsega 0 - 1200 °C, tačnosti $\pm 0,5\%$ mernog opsega.
2. Ispitivanje vlažnosti sušenog materijala vršeno je pomoću digitalnog vlagomera tip "Mettler LP16". Merenje vlage obavljeno je na određenim mernim mestima ugrađenim na pneumatskoj cevi sušare u presecima 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, prema šemi eksperimentalnog postrojenja. Merenje je vršeno u toku procesa sušenja.
3. Merenje statičkog i dinamičkog pritiska vršeno je pomoću Pito cevi u preseku 2-2, pneumatske cevi sušare.

3. Opis eksperimentalnog postrojenja sa rezultatima merenja

4. Merenje temperature vlažnog materijala na ulazu u sušaru kao i merenje temperature osušenog materijala na izlazu iz sušare vršeno je staklenim živinim termometrom opsega 0 - 50 °C.
5. Merenje potrošnje gasa na gorioniku sušare izvršeno je pomoću turbinskog merača protoka: tip TZG-DN50, $Q_{\max} = 550 \text{ m}^3/\text{h}$.

Karakteristike sušenog materijala

U tabeli 3.2. date su karakteristike sušenog materijala.

Tabela 3.2. Karakteristike korišćenog sušenog materijala.

| Vrsta materijala | Zapreminska gustina r_c [kg/m ³] | Specifična toplota c_{p1} [kJ/kgK] |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Kukuruzna mekinja | 300 | 1,25 |

Osnovne karakteristike sušenog materijala

Dati materijal se dobija iz zrna kukuruza postupkom mokre prerade. Sastoji se od suvih mekinja, odnosno celuloznog dela zrna kukuruza i obogaćuje se dodavanjem CSL-a, cornsteepa (kukuruznog ekstrakta).

Analitički podaci:

| | |
|-------------|----------|
| Vlaga | max 12 % |
| Belančevine | min 15 % |
| Skrob | oko 20 % |
| Pepeo | oko 3 % |

Mogućnost primene:

Pretežno se koristi kao kvalitetna stočna hrana ili kao komponenta kombinvanih stočnih hraniva.

3.3. Rezultati merenja

U narednim tabelama dati su rezultati merenja temperature agensa sušenja, dinamičkog pritiska i vlažnosti materijala.

Tabela 3.3. Temperatura agensa sušenja (toplog vazduha) merena na mernim mestima 1, 2, 3, 4, 5, pneumatske cevi sušare.

| Redni broj | Vreme od početka eksperimenta [h] | Temperatura u [°C] na mernom mestu | | | | |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| | | t ₁ | t ₂ | t ₃ | t ₄ | t ₅ = t _b |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 0 | 420 | 340 | 220 | 155 | 110 |
| 2 | 1 | 435 | 360 | 230 | 157 | 127 |
| 3 | 2 | 425 | 345 | 220 | 154 | 120 |
| 4 | 3 | 420 | 335 | 218 | 153 | 105 |
| 5 | 4 | 415 | 330 | 215 | 150 | 104 |
| 6 | 5 | 427 | 348 | 225 | 156 | 122 |
| 7 | 6 | 424 | 340 | 222 | 155 | 120 |
| 8 | 7 | 426 | 343 | 224 | 157 | 105 |
| Srednja vrednost | | 425 | 342 | 222 | 155 | 110 |

Tabela 3.4. Dinamički pritisak meren na mernom mestu 2-2.

| Redni broj | Vreme od početka eksperimenta [h] | Dinamički pritisak [Pa] |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | 0 | 240 |
| 2 | 1 | 300 |
| 3 | 2 | 250 |
| 4 | 3 | 230 |
| 5 | 4 | 230 |
| 6 | 5 | 270 |
| 7 | 6 | 250 |
| 8 | 7 | 250 |
| Srednja vednost | | 250 |

3. Opis eksperimentalnog postrojenja sa rezultatima merenja

Tabela 3.5. Vlažnost sušenog materijala u periodu sušenja.

| Redni broj | Vreme od početka eksperimenta [h] | Vlažnost sušenog materijala na mernom mestu u [%] | | | | |
|------------------|-----------------------------------|---|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 0 | 30 | 22 | 16 | 14 | 12 |
| 2 | 1 | 30,5 | 22,1 | 16 | 14 | 13 |
| 3 | 2 | 29 | 21,8 | 15,7 | 13,8 | 11,5 |
| 4 | 3 | 30 | 22,1 | 15,8 | 13,7 | 12,2 |
| 5 | 4 | 31 | 22,2 | 16 | 14 | 11,8 |
| 6 | 5 | 29 | 22 | 15,9 | 14 | 12,5 |
| 7 | 6 | 30,5 | 22,3 | 16 | 14 | 12,2 |
| 8 | 7 | 30 | 21,9 | 15,9 | 13,9 | 11,8 |
| Srednja vrednost | | 30 | 22 | 16 | 14 | 12 |

Tabela 3.6. Temperature vlažnog i suvog materijala.

| Materijal | Temperatura [°C] |
|--------------------------------|---------------------|
| Vlažan materijal $w_1 = 30 \%$ | $t_{w1} = 25 \pm 1$ |
| Suv materijal $w_2 = 12 \%$ | $t_{w2} = 40 \pm 1$ |

Eksperimentalna merenja vršena su u približno stacionarnim uslovima rada sušare. Pod stacionarnim uslovima podrazumeva se stacionarnost tokom dužeg vremena rada sušare i većeg broja merenja (pri čemu je isključena nestacionarnost procesa u realnim uslovima rada sušare).

4. MODELI KRIVIH KINETIKE SUŠENJA I NUMERIČKI POKAZATELJI

| | |
|--|----|
| 4.1. Određivanje krivih kinetike sušenja i fenomenoloških - empirijskih jednačina | 49 |
| 4.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 50 |

4. MODELI KRIVIH KINETIKE SUŠENJA I NUMERIČKI POKAZATELJI

Kinetika sušenja se bavi problematikom izučavanja promene vlage sa vremenom, temperature sa vremenom i brzine sušenja. Od brzine sušenja zavisi proizvodnost i gabariti postrojenja za sušenje.

Jednačine krive sušenja vlažnog materijala $w = f_1(\tau)$, jednačine temperaturske krive vlažnog materijala $t = f_2(\tau)$ i jednačine brzine sušenja vlažnog materijala $dw/d\tau = f_3(\tau)$ definišu karakter i proces sušenja. Poznavanjem ovih jednačina može se u svakom trenutku odrediti srednja vlažnost, srednja temperatura, srednja brzina sušenja vlažnog materijala kao i isparela količina vlage, dovedena količin toplote i vreme sušenja.

Razjašnjenje mehanizma sušenja na ovaj način daje mogućnost utvrđivanja optimalnog režima sušenja. Jednačine tj. modeli krivih kinetike sušenja određuju se posebno za svaku vrstu materijala na osnovu eksperimentalnih merenja i istraživanja.

4.1 Određivanje krivih kinetike sušenja i fenomenoloških - empirijskih jednačina

Pri izvođenju eksperimentalnih merenja, mere se sledeće veličine:

- sadržaj vlage u sušenom materijalu tokom procesa sušenja w [%],
- temperatura u procesu sušenja t [°C].

U procesu sušenja na konvektivnoj sušari sa pneumatskim transportom materijala, prema šemi eksperimentalnog postrojenja slika 3.1 vreme sušenja traje veoma kratko. U ovom slučaju sušenje se obavi u vremenu trajanja pneumatskog transporta kroz pneumatsku cev sušare.

Prema tome vreme sušenja iznosi:

$$t = \frac{H}{v} \quad [s] \quad (4.1)$$

gde je:

H - visina pneumatske cevi sušare [m],

v - brzina transporta [m/s].

Na osnovu podataka za vlažnost materijala w i vreme sušenja τ , definišu se krive sušenja vlažnog materijala u sistemu w [%], τ [s].

Diferenciranjem krive sušenja dobija se kriva brzine sušenja u sistemu:

$dw/d\tau$ [%/s], τ [s].

Konstrukcija temperaturske krive sušenja izvodi se na osnovu podataka za temperaturu sušenja tabela 3.3 i vremena sušenja τ [s].

Brzina transporta iznosi:

$$v = x \cdot \sqrt{\frac{2p_{din}}{r}} \quad [m/s] \quad (4.2)$$

gde je:

$\xi = 0,9$ - koeficijent protoka za Pito cev [27],

p_{din} - dinamički pritisak izmeren u preseku (2-2) u [Pa], tabela 3.4.

$\rho = p_a/RT = 1,293 [273/(273 + t_{(2-2)})]$ [kg/m³] - gustina agensa sušenja.

Protok vazduha kroz pneumatsku cev sušare iznosi:

$$V = A v = (D^2\pi/4) v \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4.3)$$

Brzina transporta iznosi:

$$v_n = V / [(273 + t_{(2-2)})/273] \cdot A [\text{m/s}] \quad (4.4)$$

Zamenom poznatih vrednosti tabela 3.3 i 3.4 u jednačine (4.2 do 4.4) dobija se $v_n = 13$ [m/s], a potom prema relaciji (4.1) dobija se vreme sušenja $\tau = 1,616$ [s].

Na osnovu jednačine 4.3 i 4.4, zamenom poznatih veličina, dobija se protok vazduha (agensa sušenja): $V = 14350$ [m³/h] tj. $m_v = 18612$ [kg/h], vazduha.

4.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja određene su jednačine krivih kinetike sušenja i to:

- jednačine krive sušenja vlažnog materijala $w = f_1(\tau)$,
- jednačine krive brzine sušenja vlažnog materijala $dw/d\tau = f_2(\tau)$ i
- jednačina temperaturske krive sušenja $t = f_3(\tau)$.

Krive kinetike sušenja definisane su na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih ispitivanjem na industrijskoj sušari sa pneumatskim transportom materijala, slika 3.1.

Parametri okoline - sredine su:

- temperatura okoline $t_a = 20 \pm 1^\circ\text{C}$
- atmosferski pritisak $p_a = 1 \text{ bar}$.

Sadržaj vlage u sušenom materijalu meren je na pet mesta na pneumatskoj cevi sušare prema slici 3.1. u periodu sušenja tabela 3.5. Merenja su izvršena uzimanjem uzoraka i merenjem pomoću digitalnog vlagomera Mettler LP-16.

Temperatura sušenja izmerena je na pet mernih mesta ugrađenih na pneumatskoj cevi sušare prema šemi eksperimentalnog postrojenja, slika 3.1. a rezultati merenja su dati u tabeli 3.3. Merenja su izvršena digitalnim termometrom opsega 0 - 1200 °C i tačnosti $\pm 0,5$ %.

Pri ovim merenjima ostvaren je direktan kontakt sonde termometra sa smešom toplog agensa sušenja i sušenog materijala.

Prilikom eksperimentalnih ispitivanja praćeni su:

- promena vlage u materijalu tokom vremena sušenja, data u tabeli 3.5,
- promena temperature agensa sušenja (toplog vazduha sa sušenim materijalom), tokom vremena sušenja, tabela 3.3.

Primenom teorije korelacija na rezultate istraživanja date su empirijske jednačine krivih kinetike sušenja, (4.5) do (4.9).

U tabeli 4.1. dati su rezultati ispitivanja za krivu sušenja i krivu brzine sušenja.

U tabeli 4.2. dati su rezultati ispitivanja za temperatursku krivu sušenja.

Rezultati ispitivanja za: krivu sušenja, krivu brzine sušenja i temperatursku krivu sušenja, definišu proces odvijanja sušenja. Njihovo poznavanje omogućuje da se odrede srednje vrednosti vlažnosti, temperature i brzine sušenja materijala, zatim odvedena količina vlage, dovedena količina toplote, kao i vreme sušenja.

Tabela 4.1. Rezultati za krivu sušenja w [%], t [s] i krivu brzine sušenja dw/dt [%/s], t [s].

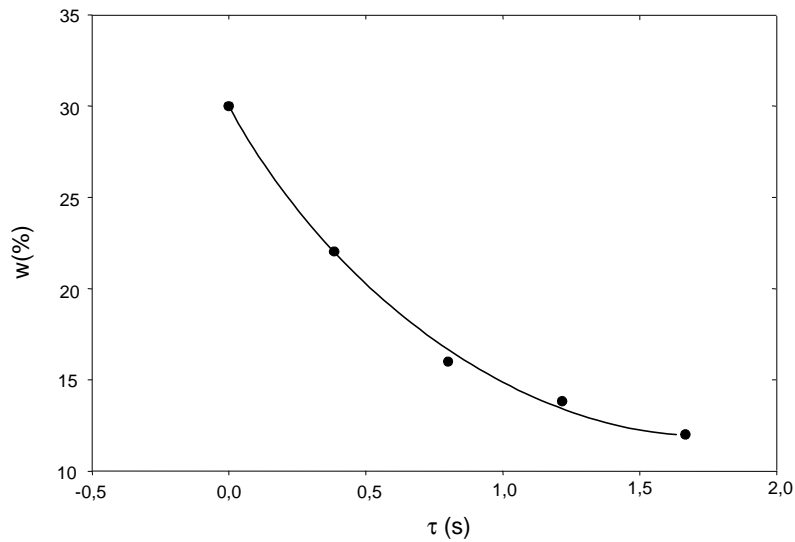
| Redni broj | Vreme od početka sušenja t [s] | Sadržaj vlage w [%] | Brzina sušenja dw/dt [%/s] |
|------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0 | 30 | 0 |
| 2 | 0,404 | 22 | 19,80 |
| 3 | 0,808 | 16 | 14,85 |
| 4 | 1,212 | 14 | 4,95 |
| 5 | 1,616 | 12 | 4,90 |

Tabela 4.2. Rezultati za temperatursku krivu sušenja.

| Redni Broj | Vreme od od početka sušenja t [s] | Sadržaj vlage w [%] | Temperatura sušenja t [°C] |
|------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0 | 30 | 425 |
| 2 | 0,404 | 22 | 342 |
| 3 | 0,808 | 16 | 222 |
| 4 | 1,212 | 14 | 155 |
| 5 | 1,616 | 12 | 110 |

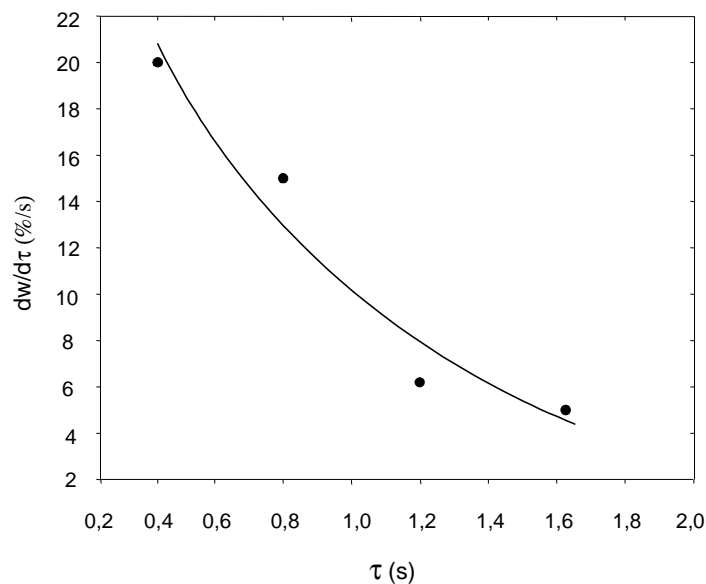
Imajući u vidu protok agenasa sušenja (toplog vazduha) kroz pneumatsku cev sušare $V = 14350$ [m_n^3/h] tj. $m_v=18612$ [kg/h], kao i masu vlažnog materijala $m_l = 9920$ [kg/h], dobija se stepen koncentracije $c_k=0,530$ [kg materijala/kg vazduha]. Ovo je u okvirima istraživanja $c_k = (0,05-2)$ kg/kg, dato u literaturi [3] i [11].

Na slici 4.1 prikazana je kriva sušenja, koja pokazuje zavisnost promene vlage sa vremenom sušenja. U početnom periodu sušenja tzv. prvom periodu sušenja zavisnost promene vlage i vremena sušenja ima približno linearan karakter, koji odgovara vremenskom periodu sušenja $\tau= 0-0,75$ [s]. To je prvi period sušenja kome odgovara konstantna brzina sušenja. U drugom periodu sušenja u vremenskom intervalu $\tau=0,75-1,616$ [s], zavisnost promene vlage i vremena sušenja nema više linearan karakter, već je pisana polinomom drugog reda. Sušenje se završava sa ravnotežnim sadržajem vlage od $w_2 = 12$ %.



Slika 4.1. Kriva sušenja.

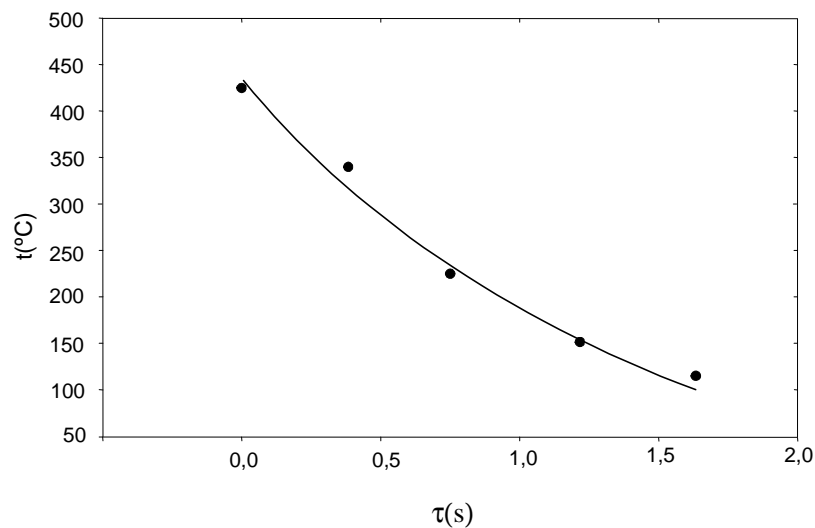
Na slici 4.2. je prikazana kriva brzine sušenja. U prvom periodu sušenja, brzina sušenja je približno konstantna, dok drugom periodu sušenja odgovara opadajuća brzina sušenja. Kada se vlažnost materijala smanji do ravnotežne vlažnosti $w = 12\%$, brzina isparavanja vlage iznosi $dw/d\tau = 5[\%/s]$, slika 4.5. .



Slika 4.2. Kriva brzine sušenja.

Na slici 4.3. data je temperaturna kriva sušenja. Zavisnost promena temperature agensa sušenja i vremena sušenja opisana je polinomom drugog reda sa koeficijentom

korelacije $R = 0,995$. U procesu sušenja - pneumatskog transporta materijala stepen koncentracije ima malu vrednost i iznosi $c_k = 0,530$, pa se može približno smatrati kao da je u pitanju transport čistog agensa sušenja. Otuda temperaturna kriva sušenja kako se vidi na slici 4.3. može imati i približno linearni karakter.



Slika 4.3. Temperaturna kriva sušenja.

U početnom periodu sušenja temperatura agensa sušenja iznosila je 425 °C, a na kraju sušenja 110 °C.

Primenom teorije korelacija - metode najmanjih kvadrata pri obradi eksperimentalnih podataka dobijene su sledeće empirijske jednačine:

- jednačina zavisnosti vlažnosti materijala od vremena sušenja:

$$w = 29,88 - 22,20 \tau + 7,00 \tau^2 \quad (4.5)$$

$$R = 0,998$$

$$R\check{C}2 = 0,995$$

$$SD = 0,676$$

- jednačina zavisnosti brzine sušenja od vremena:

$$dw/d\tau = 30,90 + 28,67 \tau + 7,50 \tau^2 \quad (4.6)$$

$$R = 0,966$$

$$R\check{C}2 = 0,934$$

$$SD = 3,309$$

- jednačina temperaturske krive sušenja:

$$t = 432 - 293,45 \tau + 56,45 \tau^2 \quad (4.7)$$

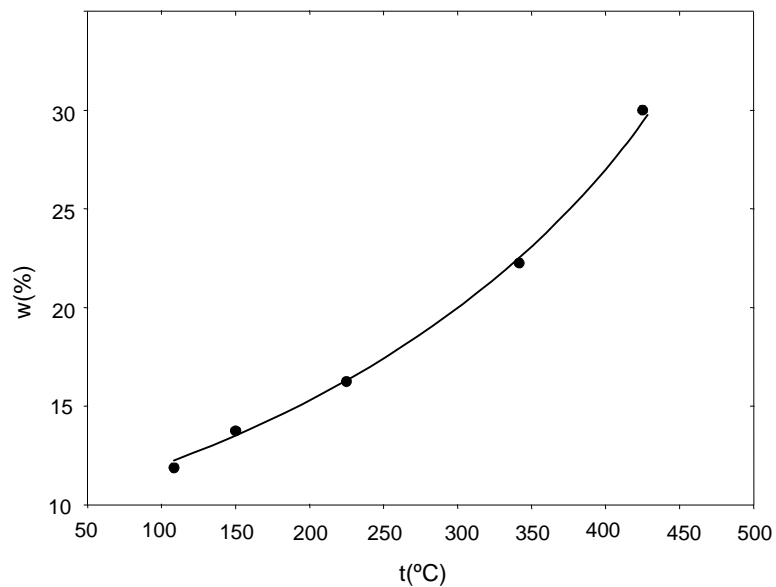
$$R = 0,995$$

$$R\check{C}2 = 0,991$$

$$SD = 16,69$$

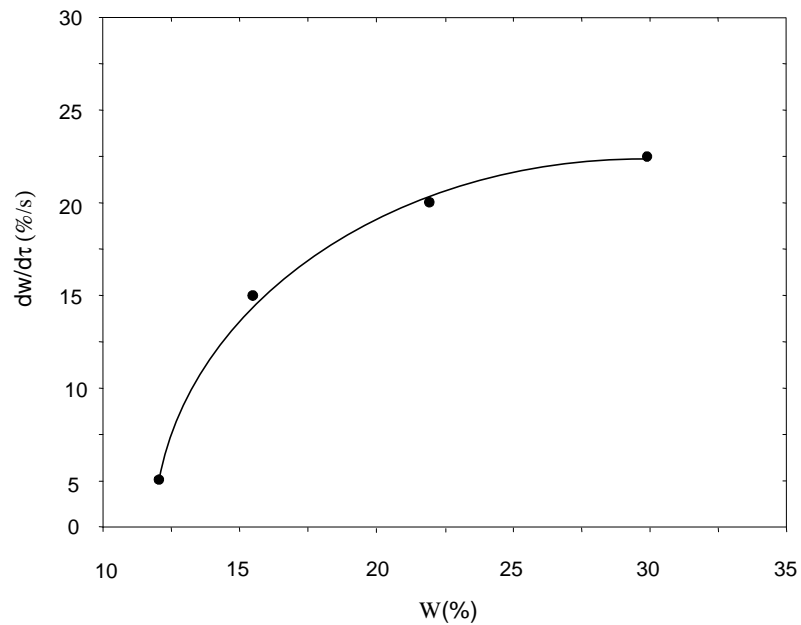
Date empirijske jednačine dobijene na osnovu eksperimentalnih istraživanja najpotpunije definišu karakter odvijanja procesa sušenja.

Na slici 4.4. data je zavisnost promene vlažnosti materijala i temperature sušenja.



Slika 4.4. Zavisnost promene vlažnosti materijala i temperature sušenja.

Zavisnost promene brzine sušenja i vlažnosti materijala data je na sl. 4.5.



Sl. 4.5. Zavisnost promene brzine sušenja i vlažnosti materijala.

Primenom teorije korelacija, metode najmanjih kvadrata na rezultate istraživanja date u tabeli 4.1 i 4.2 mogu se izvesti fenomenološke jednačine i zavisnosti:

- jednačina zavisnosti vlažnosti materijala i temperature sušenja:

$$w = 12,43 - 0,0133 t + 1,268 t^2 \quad (4.8)$$

$$R = 0,966$$

$$R\check{C}^2 = 0,994$$

$$SD = 0,799$$

- jednačina zavisnosti brzine sušenja i vlažnosti materijala:

$$dw/d\tau = - 32,35 + 4,05w - 0,074w^2 \quad (4.9)$$

$$R = 0,939$$

$$R\check{C}2 = 0,980$$

$$SD = 1,862$$

Na početku sušenja, površina čestica vlažnog materijala prekrivena je veoma tankim slojem vode, koja ima iste osobine kao da je slobodna voda. Usled dodira površine čestica vlažnog materijala sa toplim agensom sušenja nastaje proces isparavanja tečnosti. Pri tome tečnost u početku (prvi period sušenja) brže isparava, obzirom da je u pitanju fizičko mehanički vezana vlaga, sl. 4.5. U drugom periodu brzina sušenja znatno opada, obzirom da je u pitanju fizičko-hemijski vezana vlaga.

**5. ENERGETSKI BILANS KONVEKTIVNE PNEUMATSKE
SUŠARE I NUMERIČKI POKAZATELJI**

| | |
|--|----|
| 5.1. Određivanje energetskog bilansa, specifične potrošnje energije i termičkog stepena iskorišćenja | 59 |
| 5.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 61 |
| 5.3. Energetski bilans pri povećanju kapaciteta sušare | 63 |

**5. ENERGETSKI BILANS KONVEKTIVNE PNEUMATSKE SUŠARE I
NUMERIČKI POKAZATELJI**

Količina energije koja se troši u različitim energetskim postrojenjima kao što su sušare, kotlovi, industrijske peći, razmenjivači toplotne i dr zavisi od načina vođenja procesa, tehničkih rešenja, stanja opreme i podešenosti i dr.

Poznavanje specifične potrošnje energije mašina i aparata procesne tehnike i energetike, njeno neprekidno praćenje u tehnološkom procesu proizvodnje i analiza uticajnih parametara su osnovni elementi optimizacije potrošnje energije.

Proces sušenja po svojoj specifičnosti je energetski proces gde se ukupno uložena energija troši na: isparavanje vode, zagrevanje sušenog materijala i toplotne gubitke.

Na osnovu toga zadatak energetskog bilansa je da se odrede odnosi između količine energije koja se ulaže u proces, iskorišćene energije i gubitaka.

Iz tih razloga energetski bilansi su vrlo značajni za dijagnozu stanja sušare i za razmatranje mogućnosti uštede energije, [124].

5.1. Određivanje energetskog bilansa, specifične potrošnje energije i termičkog stepena iskorišćenja

Ukupna količina toplote pri konvektivnom sušenju sastoji se od količine toplote za: isparavanje vode, zagrevanje materijala i toplotnih gubitaka prema literaturi [3], [28] i [49].

1. Iskorišćenje toplote u sušari dato je odgovarajućim entalpijskim padom sledećom relacijom:

$$h = c_{pm} (t_1 - t_b) \left[\frac{kJ}{m_n^3} \right] \quad (5.1)$$

gde je:

t_1 - temperatura ulaznog vazduha u sušaru [°C],

t_b - temperatura bridova - izlaz iz sušare [°C],

$c_{pm} = 1,297$ - specifična toplota vazduha [kJ/m³K].

2. Toplota potrebna za otparavanje vode je izražena relacijom:

$$\mathcal{Q}_w = W [r_0 + c_{pw} (t_b - t_{w1})] \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.2)$$

gde je:

W - količina isparele vode [kg/h],

$r_0 = 2500$ [kJ/kg] - toplota isparavnja vodene pare,

$c_{pw} = 1,92$ [kJ/kgK] - srednja vrednost specifične toplote pregrejane vodene pare,

t_{w1} - temperatura vlažnog materijala [°C].

3. Toplota potrebna za zagrevanje materijala:

$$\dot{Q}_s = m_1 \left[c_{p1} \frac{100 - w_2}{100} + \frac{w_2}{100} c_{p2} \right] (t_{w2} - t_{w1}) \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.3)$$

gde je:

m_1 - masa vlažnog materijala [kg/h],

c_{p1} - specifična toplota materijala za sušenje [kJ/kgK],

$c_{p2} = 4,187$ [kJ/kgK] - specifična toplota vode,

t_{w2} - temperatura suvog materijala.

4. Toplota potrebna za zagrevanja vazduha koji ulazi u sušaru na mestima slabog zaptivanja i kroz procepe:

$$\dot{Q}_p = W \cdot p_r \cdot c_{pw} (t_b - t_{w1}) \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.4)$$

gde je:

p_r - procenat gubitaka;

za pneumatske sušare računa se sa iskustvenim podatkom $p_r = 40/100$, prema [3].

5. Gubici toplote od zračenja i provođenja toplote: ova vrsta gubitaka uzima se na osnovu iskustvenih normi: 4% od zbira iz formula (5.2), (5.3) i (5.4), prema literaturi [3] i [49]:

$$\dot{Q}_z = 0,04(Q_w + Q_s + Q_p) \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.5)$$

6. Potrebna količina vazduha iznosi:

$$V_L = \frac{Q_w + Q_s + Q_p + Q_z}{h} \left[\frac{m_n^3}{h} \right] \quad (5.6)$$

7. Gubici toplote sa izlaznim vazduhom:

$$\dot{Q}_L = \dot{V}_L (h_b - h_L) \quad \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.7)$$

8. Ukupna količina toplote:

$$\dot{Q}_U = \dot{Q}_W + \dot{Q}_S + \dot{Q}_P + \dot{Q}_Z + \dot{Q}_L \quad \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5.8)$$

9. Specifična potrošnja energije:

$$q = \frac{\dot{Q}_U}{W} \quad \left[\frac{kJ}{kgH_2O} \right] \quad (5.9)$$

10. Termički stepen iskorišćenja:

$$h = \frac{\dot{Q}_U - \dot{Q}_g}{\dot{Q}_U} = \frac{t_1 - t_b}{t_1} \quad (5.10)$$

5.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena na industrijskom postrojenju konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala, slika 3.1. imala su za cilj određivanje energetskog bilansa, specifične potrošnje energije i termičkog stepena iskorišćenja, kao relevantnih energetskih parametara.

Prilikom određivanja datih energetskih parametara korišćeni su rezultati eksperimentalnih merenja: vlažnosti materijala, temperature agensa sušenja, temperature materijala date u tabelama 3.3, 3.5 i 3.6, kao i podaci materijalnog bilansa sušare slika 3.1 i 3.2. Na osnovu datih rezultata merenja, primenom jednačina (5.1 do 5.10) utvrđen je energetski bilans konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala. Rezultati energetskog bilansa dati su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Energetski bilans konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala (prečnik cevi $D = 0,625 \text{ m}$; visina cevi $H = 21 \text{ m}$.)

| Red. Br. | Parametri energetskog bilansa | Oznaka i jed. mere | Karakt. energ. bilansa |
|----------|---|--|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Temperatura ulaznog vazduha u sušaru | $t_1 [^{\circ}\text{C}]$ | 425 |
| 2 | Količina isparele vode | $W [\text{kg/h}]$ | 2030 |
| 3 | Ukupna količina toplote | $\dot{Q}_u [kJ/h]$ | 7955300 |
| 4 | Toplotna snaga sušenja | $Q_u [\text{kW}]$ | 2210 |
| 5 | Specifična potrošnja energije | $q [\text{kJ/kgH}_2\text{O}]$ | 3918 |
| 6 | Količina vazduha za sušenje | $V_L [\text{m}_n^3/\text{h}]$ | 14350 |
| 7 | Specifična količina isparele vode | $[\text{kg H}_2\text{O} / \text{m}^2\text{h}]$ | 49 |
| 8 | Potrošnja gasa $H_d=32000\text{kJ/m}^3$ | $V_G [\text{m}^3/\text{h}]$ | 250 |
| 9 | Temperatura bridova | $t_b [^{\circ}\text{C}]$ | 110 |
| 10 | Termički stepen iskorišćenja | $\eta_t [-]$ | 0,74 |

U procesu eksperimentalnog sušenja određena je ukupna količina toplote odnosno toplotna snaga koja iznosi $Q_n = 2210 \text{ kW}$ i predstavlja polazni podatak pri usavršavanju postrojenja sušare.

Srednja specifična potrošnja energije iznosi $q = 3918 \text{ kJ/kgH}_2\text{O}$. Prema [3], [11] i [22] specifična potrošnja energije pri konvektivnom sušenju kreće se u granicama od (3900-5040) $\text{kJ/kgH}_2\text{O}$.

Dati energetski bilans tabela 5.1, konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala može poslužiti pri oceni energetskog stanja sušare kao i za razmatranje mogućnosti racionalne potrošnje energije.

Ukupni toplotni bilans sušare sastoji se iz toplote potrebne za zagrevanje materijala, toplote potrebne za isparavanje vode i toplotnih gubitaka u okolinu, pri čemu je termički stepen iskorišćenja sušare $\eta_t=0,74$.

Kvalitet osušenog materijala (ulazna vlaga, izlazna vlaga) i specifična potrošnja energije su osnovni pokazatelji tj. parametri koji karakterišu proces sušenja. Praćenje ovih parametara je osnovni preduslov za optimalni režim sušenja.

5.3. Energetski bilans pri povećanju kapaciteta sušare

Povećanje kapaciteta proizvodnje u fabrikama za industrijsku preradu žitarica, zahteva adekvatne kapacitete svih mašina i aparata u liniji tehnološkog procesa proizvodnje.

Problematika povećanja kapaciteta konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala usmerena je na proces rekonstrukcije - remonta sušare sa aspekta povećanja prečnika pneumatske cevi sušare ili samo povećanja visine pneumatske cevi sušare, [125].

Na osnovu jednačine kapaciteta sušare prema [3] sledi:

$$G_m = \frac{kV_k \Delta t_{sr}}{c_{pm}(t_{m2} - t_{m1})} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (5.11)$$

gde je:

k - koeficijent prenosa toplote [W/m³K], [kJ/m³hK],
V_k - zapremina pneumatske cevi sušare [m³],
Δt_{sr} - srednja logaritamska razlika temperatura [°C],
c_{pm} - specifična toplota sušenog materijala [kJ/kgK],
t_{w1} - temperatura suš. materijala na ulazu u sušaru [°C],
t_{w2} - temperatura suš. materijala na izlazu iz sušare [°C].

$$\Delta t_w = t_{w2} - t_{w1} \quad [^{\circ}C]$$

Obzirom da zapremina pneumatske cevi sušare iznosi:

$$V_k = (D^2 \pi / 4) H \quad [m^3] \quad (5.12)$$

gde je:

D - prečnik cevi sušare [m],
H - visina cevi sušare [m].

Visina pneumatske cevi sušare može se izraziti sledećom relacijom:

$$H = v \tau [m] \quad (5.13)$$

gde je:

v - brzina pri pneumatskom transportu i sušenju [m/s]

τ - vreme sušenja [s].

Na osnovu toga kapacitet sušare iznosi:

$$G_m = \frac{kD^2 p \Delta t_{sr}}{4c_{pm} \Delta t_w} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (5.14)$$

Na osnovu date jednačine 5.14 i uticajnih parametara na sam kapacitet sušare kao što su npr. prečnik cevi sušare D , i visina sušare H , može se reći da povećanje kapaciteta sušare je moguće povećanjem prečnika cevi sušare ili povećanjem visine cevi sušare.

Imajući u vidu samo postrojenje sušare slika 3.1 i tabela 3.1, za potrebe povećanja kapaciteta sušare u periodu remonta moguće je zameniti postojeću pneumatsku cev sušare sa novom cevi odgovarajućeg većeg prečnika, kao jedno moguće rešenje. Druga varijanta rešenja u cilju povećanja kapaciteta sušare dozvoljava odgovarajuće povećanje visine pneumatske cevi sušare, a to znači da se na taj način produžva vreme sušenja, a samim tim i povećava kapacitet sušare.

Na osnovu energetskog bilansa sušare tabela 5.1, ukupna količina toplote iznosi $Q_u = 7955300$ kJ/h, što odgovara toplotnoj snazi $Q_n = 2210$ kW.

Prema šemi eksperimentalnog postrojenja slika 3.1 i tabela 3.1, vidi se da ukupno raspoloživa toplotna snaga gasnog gorionika - sušare iznosi $Q_n = 3,4$ MW. Na osnovu toga može se reći da postoji mogućnost povećanja kapaciteta sušare sa postojećim predajnikom toplote.

Na osnovu šeme eksperimentalnog postrojenja slika 3.1, kapacitet ventilatora (poz.6) iznosi $V = 26000$ m³/h. Pri povećanju kapaciteta sušare potrebno je svakako imati u vidu kapacitet samog ventilatora poz. 6. Tako su npr. u tabeli 5.2, date energetske karakteristike i režim sušenja pri povećanju prečnika cevi sušare.

Tabela 5.2. Parametri energetskog bilansa za prečnike sušare ($D_1=625\text{mm}$ i $D_2=800\text{mm}$), pri visini cevi od $H = 21\text{ m}$.

| Red. Broj | Parametri energetskog bilansa i režima sušenja | Prečnik cevi sušare | |
|-----------|---|---------------------|-------------------------|
| | | $D_1=625\text{mm}$ | $D_2=800\text{mm}^{1)}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Kapacitet prerade t/dan | 280 | 350 |
| 2 | Temperatura ulaznog vazduha °C | 425 | 400 |
| 3 | Količina isparele vode kg/h | 2030 | 2950 |
| 4 | Toplotna snaga MW | 2,21 | 3,27 |
| 5 | Specifična potrošnja energije kJ/kgH ₂ O | 3918 | 3998 |
| 6 | Količina vazduha za suš. m _n ³ /h | 14350 | 23400 |
| 7 | Spec. količina isparele vode kgH ₂ O/ m ² h | 49 | 56 |
| 8 | Potrošnja gasa m ³ /h | 250 | 370 |
| 9 | Temperatura bridova °C | 110 | 110 |
| 10 | Termički stepen iskorišćenja | 0,740 | 0,725 |
| 11 | Spec. količina isparele vode kgH ₂ O/ m ³ h | 315 | 458 |

Na osnovu rezultata istraživanja datih u tabeli 5.2, pri povećanju prečnika cevi sušare sa $\varnothing 625\text{ mm}$ na $\varnothing 800\text{ mm}$, potrebna je toplotna snaga predajnika toplote - gasnog gorionika $Q = 3,27\text{ MW}$ i kapacitet ventilatora $V = 32830\text{ m}_n^3/\text{h}$ vazduha.

Prema šemi eksperimentalnog postrojenja slika 3.1 i tabela 3.1, postrojenje sušare raspolaže sa gasnim gorionikom toplotne snage $Q = 3,4\text{ MW}$ i ventilatorom kapaciteta $V = 26000\text{ m}_n^3/\text{h}$. Na osnovu toga može se zaključiti sledeće:

Pri povećanju kapaciteta sušare tabela 5.2. potrebno je povećati prečnik cevi sušare sa $\varnothing 625\text{ mm}$ na $\varnothing 800\text{ mm}$ i ugraditi novi ventilator odgovarajućeg kapaciteta. Obzirom na obim i karakter ovih radova potrebni su odgovarajući tehnički i vremenski kapaciteti, koje je realno planirati u periodu remonta tehničkih sistema.

U tabeli 5.3. date su energetske karakteristike i režim sušenja za slučaj povećanja visine pneumatske cevi sušare.

¹⁾ Prečnik $D = 800\text{ mm}$ odgovara povećanju kapaciteta sušare na $350 \pm 10^3\text{ kg/dan}$ prerade kukuruznog zrna

Tabela 5.3. Parametri energetskog bilansa za prečnik cevi sušare $D=625\text{mm}$ i visine cevi sušare od $H_1 = 21\text{ m}$ i $H_2 = 26\text{ m}$.

| Red. Broj | Parametri energetskog bilansa i režima sušenja | Visina cevi sušare | |
|-----------|---|--------------------|-------------------|
| | | $H_1=21\text{ m}$ | $H_2=26\text{ m}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Kapacitet prerade t/dan | 280 | 350 |
| 2 | Temperatura ulaznog vazduha °C | 425 | 525 |
| 3 | Količina isparele vode kg/h | 2030 | 2950 |
| 4 | Toplotna snaga MW | 2,21 | 3,27 |
| 5 | Specifična potrošnja energije kJ/kgH ₂ O | 3918 | 3998 |
| 6 | Količina vazduha m _n ³ /h | 14350 | 14350 |
| 7 | Količina bridova m ³ /h | 20150 | 20150 |
| 8 | Potrošnja gasa m ³ /h | 250 | 370 |
| 9 | Temperatura bridova °C | 110 | 110 |
| 10 | Termički stepen iskorišćenja | 0,740 | 0,790 |
| 11 | Spec. količina isparele vode kgH ₂ O/ m ³ h | 315 | 370 |

Kao što se vidi iz tabele 5.3. povećanje kapaciteta sušare može se ostvariti ako se poveća visina same pneumatske cevi sušare, a da pri tom prečnik ostane nepromenjen. Tako se pri povećanju kapaciteta sušare visina cevi menja sa $H_1 = 21\text{ m}$ i povećava se na $H_2 = 26\text{ m}$. Na taj način vreme sušenja se produžava sa $\tau_1 = 1,616\text{ s}$ na $\tau_2 = 2\text{ s}$. Proporcionalno tome povećava se kapacitet sušare, kako je dato formulama (5.11 do 5.14).

Pri povećanju kapaciteta sušare potrebna je toplotna snaga od $Q = 3,27\text{ MW}$ i kapacitet ventilatora $V = 14350\text{ m}_n^3/\text{h}$ vazduha. Prema šemi eksperimentalnog postrojenja slika 3.1, gasni gorionik, poz.1 ima toplotnu snagu $Q = 3,4\text{ MW}$, a ventilator poz. 6 ima kapacitet od $V = 26000\text{ m}_n^3/\text{h}$.

Na osnovu toga mašine i aparati kao što su gasni gorionik i ventilator u potpunosti zadovoljavaju u slučaju povećanja kapaciteta sušare. Prema podacima iz tabele 5.3, dolazi do promene režima sušenja tako što se temperatura ulaznog vazduha povećava sa 425 °C na 525 °C , a visina cevi sušare se povećava sa $H_1 = 21\text{ m}$ na $H_2 = 26\text{ m}$.

Obzirom na karakter i obim radova pri povećanju visine cevi sušare sa $H_1 = 21\text{ m}$ na $H_2 = 26\text{ m}$, potrebno je postojeću cev prečnika $D = 625\text{ mm}$, produžiti za $\Delta H = 5\text{ m}$.

Prema šemi eksperimentalnog postrojenja, slika 3.1, prilikom produženja cevi sušare poz. 3, dolazi do podizanja glave sušare poz.4.

Imajući sve ovo u vidu može se reći da je povoljnija varijanta u slučaju povećanja kapaciteta sušare ako se usvoji rešenje sa povećanjem visine cevi sušare.

Za izvođenje investicionih radova na produženju cevi sušare za $\Delta H=5$ m, potrebni su odgovarajući tehnički i vremenski kapaciteti, koje je realno planirati u periodu remonta tehničkih sistema.

6. KOEFICIJENTI I MODELI PRENOSA TOPLOTE SA
NUMERIČKIM POKAZATELJIMA

| | |
|--|----|
| 6.1. Određivanje ukupnog koeficijenta prenosa toplote (k_u) | 69 |
| 6.1.1. Određivanje koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (α) i modeli prenosa toplote | 72 |
| 6.1.2. Određivanje koeficijenta prelaza toplote (k_i) | 75 |
| 6.1.3. Koeficijenti prenosa toplote od kondukcije i zračenja ($k_p + k_r$) | 76 |
| 6.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija | 78 |

**6. KOEFICIJENTI I MODELI PRENOSA TOPLOTE SA NUMERIČKIM
POKAZATELJIMA**

Prilikom projektovanja mašina i aparata procesne tehnike i tehnologije, važan energetski parametar je koeficijent prenosa toplote. Poznavanje koeficijenta prenosa toplote kod tehnoloških operacija kao što su sušenje, ukuvavanje, transport fluida i dr omogućuje određivanje toplotnih parametara kao i određivanje površine prenosa toplote tj dimenzionisanje mašina i aparata procesne tehnike.

Prenos toplote može se izraziti sledećom relacijom:

$$Q = k A \Delta t \quad [W] \quad (6.1)$$

gde je:

k - koeficijent prenosa toplote [W/m^2K],

A - površina [m^2],

Δt - temperaturska razlika [$^{\circ}C$].

Prema jednačini (6.1), efikasnost prenosa toplote zavisi od koeficijenta prenosa toplote k , veličine površine A za razmenu toplote i temperaturske razlike Δt .

Veličina koja karakteriše dimenzije mašina i aparata je površina A . Prilikom projektovanja ona se određuje za svaki slučaj posebno.

Uslovi pod kojima se odvija tehnološki proces često puta definišu temperatursku razliku Δt .

Koeficijent prenosa toplote važan je energetski parametar pri projektovanju npr. sušara, uparivača, razmenjivača toplote, kondenzatora itd. U literaturi postoji vrlo malo kvalitativnih i kvantitativnih podataka za koeficijente prenosa toplote [12], [17]. Iz tih razloga koeficijenti prenosa toplote se određuju eksperimentalno na oglednim industrijskim postrojenjima.

Za razne vrste razmene toplote, vrednosti koeficijenata toplote kreću se u širokim granicama.

Orientacione vrednosti koeficijenta prenosa toplote (k), prema [2, 30], date su u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Orientacione vrednosti koeficijenta prenosa toplote (k).

| Vrsta razmene toplote | k [W/m ² K] prinudna konvekcija | k [W/m ² K] prirodna konvekcija |
|---|---|---|
| Kondezujuća vodena para - organske tečnosti | 120 - 340 | 60 - 170 |
| Tečnost - tečnost (voda) | 800 - 1700 | 140 - 340 |
| Gas - tečnost (hlađenje gasa) | 10 - 60 | 6 - 20 |
| Kondezujuća vodena para - gas (grejanje gasa) | 10 - 60 | 6 - 12 |
| Gas - tečnost (hlađenje gasa) | 10 - 60 | 6 - 20 |

6.1. Određivanje ukupnog koeficijenta prenosa toplote (k_u)

Važan energetski parametar pri određivanju energetskog bilansa konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala je koeficijent prenosa toplote.

Pri izvođenju eksperimentalnih merenja prema šemi ekperimentalnog postrojenja slika 3.1, mereni su osnovni parametri sušenja i to:

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

| | |
|--|--|
| - temperatura vlažnog materijala na ulazu u sušaru | $t_{w1} [^{\circ}\text{C}]$ |
| - temperatura suvog materijala na izlazu iz sušare | $t_{w2} [^{\circ}\text{C}]$ |
| - temperatura agensa sušenja (vazduha) na ulazu u sušaru | $t_1 [^{\circ}\text{C}]$ |
| - temperatura bridova na izlazu iz sušare | $t_b [^{\circ}\text{C}]$ |
| - brzina strujanja vazduha u cevi sušare | $v [\text{m/s}]$ |
| - protok vazduha | $V [\text{m}^3/\text{h}], G_v [\text{kg/h}]$ |
| - Kapacitet sušare | $G_m [\text{kg/h}]$ |

Jednačine energetskog bilansa konvektivne sušare mogu se dati prema [3], u sledećem obliku:

$$Q = G_m c_{p1} (t_{w1} - t_{w2}) \quad [\text{W}] \quad (6.2)$$

Odnosno:

$$Q = G_v c_{pv} (t_1 - t_2) \quad [\text{W}] \quad (6.3)$$

gde su:

c_{p1} - specifična toplota sušenog materijala [kJ/kgK],

c_{pv} - specifična toplota agensa sušenja [kJ/kgK].

Koeficijent prenosa toplote određuje se pomoću jednačine za prenos toplote u sledećem obliku:

$$Q = k_u A \Delta t_{sr} \quad [\text{W}] \quad (6.4a)$$

$$Q = k_v V_k \Delta t_{sr} \quad [\text{W}] \quad (6.4b)$$

Odakle sledi relacija za koeficijent prenosa toplote:

$$k_u = Q / (A \Delta t_{sr}) \quad [\text{W} / \text{m}^2\text{K}] \quad (6.5a)$$

$$k_v = Q / (V_k \Delta t_{sr}) \quad [\text{W} / \text{m}^3\text{K}] \quad (6.5b)$$

gde su:

A - površina sušenog materijala [m^2], prema lit. [11] ova veličina se određuje kao unutrašnja površina cevi sušare ,

V_k - zapremina pneumatske cevi sušare [m^3],

Δt_{sr} - srednja logaritamska razlika temperatura [$^{\circ}C$].

$$\Delta t_{sr} = (t_1 - t_2) / \ln [(t_1 - t_M) / (t_2 - t_M)] \quad [^{\circ}C] \quad (6.6)$$

gde je:

t_M - srednja temperatura vlažnog termometra [$^{\circ}C$]

$$t_M = \frac{t_{1V} + t_{2V}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (6.7)$$

Obzirom da pri izvođenju eksperimentalnih merenja na industrijskom postrojenju konvektivne pneumatske sušare, temperatura na ulazu u sušaru je $t_1 = 425^{\circ}C$ i na izlazu iz sušare je $t_2 = 110^{\circ}C$ i da je srednja temperatura vlažnog termometra prema h, x dijagramu za vlažan vazduh $t_M = 61^{\circ}C$, to je srednja logaritamska razlika temperatura na osnovu relacije (6.6) $\Delta t_{sr} = 157^{\circ}C$.

Koeficijent prenosa toplote dat relacijom (6.5a), ujedno predstavlja ukupni koeficijent prenosa toplote i može se predstaviti sledećom relacijom:

$$k_u = \alpha + k_i + k_p + k_r \quad [W / m^2K] \quad (6.8)$$

gde je:

α - koeficijent prelaza toplote konvekcijom sa agansa sušenja na sušeni materijal u [W / m^2K],

k_i - koeficijent prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare u [W / m^2K],

$(k_p + k_r)$ - koeficijent prelaza toplote od provođenja - kondukcije i zračenja u [W / m^2K].

Na osnovu toga koeficijent prenosa toplote od provođenja - kondukcije i zračenja, može se odrediti iz sledeće relacije:

$$k_p + k_r = k_u - (\alpha + k_i) [W / m^2K] \quad (6.9)$$

6.1.1. Određivanje koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (a) i modeli prenosa toplote

Na osnovu relacije energetskog bilansa u poglavlju 5, jednačine 5.2 i 5.3 predstavljaju količine toplote za isparavanje vode i količinu toplote za zagrevanje sušenog materijala.

Zbir relacije 5.2 i 5.3 daje ukupnu količinu toplote koja se predaje pri konvektivnom prelazu toplote u procesu sušenja:

$$\mathcal{Q}_{konv} = \mathcal{Q}_n + \mathcal{Q}_s \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (6. 10)$$

$$Q_{konv} = W[r_o + c_{pw}(t_b - t_{w1})] + m_1 \left(c_{p1} \frac{100 - w_2}{100} + \frac{w_2}{100} c_{p2} \right) (t_{w2} - t_{w1}) \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (6. 11)$$

Pri konvektivnom sušenju koeficijent prelaza toplote od agensa sušenja na sušeni materijal ima značajnog uticaja na brzinu procesa samog sušenja prema lit. [60].

Koeficijent prelaza toplote konvekcijom u dinamičkim uslovima rada sušare, zavisi od većeg broja različitih veličina koje karakterišu prelaženje toplote, kao što su toplotni fluks, površina sušenog materijala, temperaturska razlika i dr.

Sva složenost fenomena prelaza toplote kod ovih sistema sušenja sadržana je u konvektivnom koeficijentu prelaza toplote, čiju je veličinu neophodno znati za svaki pojedinačni slučaj [35].

U okviru ovog dela rada utvrdiće se efekti prelaza toplote pri konvektivnom sušenju u proizvodnim uslovima rada konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala (slika 3.1.). Na taj način biće utvrđeni bazni parametri prelaza toplote kod ovakvog tipa sušenja.

Pri konvektivnom sušenju, toplota neophodna za isparavanje vode predaje se sušenom materijalu putem neposrednog kontakta sa zagrejanim vazduhom ili gasom.

Na osnovu toga važi relacija:

$$Q_{konv} = a \cdot A \cdot \Delta t_{sr} \quad [W] \quad (6.12)$$

gde je:

α - Koeficijent prelaza toplote konvekcijom [W/m^2K],

A - Površina suš. materijala [m^2],

Δt_{sr} - Srednja logaritamska razlika temperature [$^{\circ}C$].

Koeficijent prelaza toplote (α) sadržan je kao relevantan parametar u Nuseltovom broju:

$$N_u = \frac{a \cdot d}{I_v} \quad (6.13)$$

gde je:

d - Prečnik cevi sušare [m],

λ_v - Termička provodnost agensa sušenja (toplog vazduha) [W/mK].

Faktori koji utiču na koeficijent prelaza toplote konvekcijom (α) su:

- Toplotna provodnost vazduha (agensa sušenja) (λ_v);
- Specifična toplota vazduha (c_p);
- Masena brzina vazduha (G);
- Prečnik cevi sušare (d) i
- Dinamička viskoznost vazduha (μ).

Primenom dimenzione analize, sistema ML θ TFH,(masa, dužina, temperatura, vreme, sila) [21], [30], dobija se:

$$\alpha = f(G, d, c_p, \mu, \lambda_v, CH) \quad (6.14)$$

Izraz (6.14) se može predstaviti beskonačnim redom sledećom relacijom:

$$\alpha = K G^a d^b c_p^e \mu^f \lambda_v^i C^m + K_1 G^{a_1} d^{b_1} c_p^{e_1} \mu^{f_1} \lambda_v^{i_1} C^{m_1} + \dots \quad (6.15)$$

gde je:

CH - dimenziona konstanta.

Obzirom da su svi članovi reda slični po obliku, može da se razmatra samo prvi član [30]:

$$\alpha = K G^a d^b c_p^e \mu^f \lambda_v^i CH^m \quad (6.16)$$

Zamenom dimenzija se dobija:

$$\frac{H}{qL^2T} = \left(\frac{M}{qL^2}\right)^a (L)^b \left(\frac{H}{MT}\right)^e \left(\frac{M}{Lq}\right)^f \left(\frac{H}{qLT}\right)^i \left(\frac{ML^2}{Hq^2}\right)^m \quad (6.17)$$

$$\begin{aligned} \sum M: & \quad 0 = a - e + f + m \\ \sum L: & \quad -2 = -2a + b - f - i + 2m \\ \sum \theta: & \quad -1 = -a - f - i - 2m \\ \sum T: & \quad -1 = -e - i \\ \sum H: & \quad 1 = e + i - m \end{aligned}$$

Rešenja eksponenata su:

$$b = a - 1; \quad f = e - a; \quad i = 1 - e; \quad m = 0$$

Zamenom u jednačini (6.16) dobija se:

$$a = \frac{I_v}{d} k^i \left(\frac{d \cdot G}{m}\right)^a \left(\frac{c_p \cdot m}{I_v}\right)^e \quad (6.18)$$

Prema korelacionoj jednačini (6.18) relevantni uticajni faktori su Rejnoldsov i Prandtlov broj, što je u skladu sa [30] i [35], za prinudnu konvekciju.

Imajući u vidu da se Prandtlov broj vrlo malo menja za dvoatomne gasove, npr. za vazduh je $Pr = 0,7$ dovoljno je uzeti samo dva bezdimenziona odnosa tj. Nuseltov i Rejnoldsov broj [30], [50], na osnovu toga jednačina (6.18) dobija sledeći oblik:

$$a = \frac{I_v}{d} K \left(\frac{d \cdot G}{m}\right)^a \quad (6.19)$$

Na taj način rezultati eksperimentalnih i teorijskih istraživanja korelišu se bezdimenzionom jednačinom Nuseltovog tipa:

$$\text{Nu} = K \cdot \text{Re}^a \quad (6.20)$$

Rejoldsov broj određuje se pomoću jednačine:

$$\text{Re} = \frac{d G}{\mu} \quad (6.21)$$

gde je:

- d - prečnik cevi sušare [m];
- G - masena brzina strujanja vazduha u [kg/sm²];
- μ - dinamički viskozitet u [kg/sm].

Masena brzina strujanja vazduha određuje se pomoću relacije:

$$G = v \rho \quad [\text{kg/sm}^2] \quad (6.22)$$

gde je:

- v - brzina strujanja vazduha agensa sušenja u [m/s];
- ρ - gustina vazduha [kg/m³].

Konstante K i a, u jednačini (6.20) određuju se metodom najmanjih kvadrata.

6.1.2. Određivanje koeficijenta prelaza toplote (k_i)

Određivanje koeficijenta prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare sprovodi se na sledeći način:

Gubici toplote sa izlaznim vazduhom dati su relaciom (5.7) u poglavlju 5. sledećom jednačinom:

$$\dot{Q}_L = v_L (h_b - h_L) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (6.23)$$

Prelaz toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare može se odrediti sledećom jednačinom koja definiše toplotnu snagu ovih gubitaka:

$$Q_L = k_i \cdot A \cdot \Delta t_{sr} \quad [W] \quad (6.24)$$

Koeficijent prenosa toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare određen je sledećom formulom:

$$k_i = \frac{Q_L}{A \cdot \Delta t_{sr}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.25)$$

6.1.3. Koeficijenti prenosa toplote od kondukcije i zračenja ($k_p + k_r$)

Koeficijent prenosa toplote od provođenja-kondukcije kroz zid cevi sušare (k_p):

Za cilindrično telo tj. za cev sušare, važi relacija za koeficijent prenosa toplote:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{2pl_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.26)$$

Za velike prečnike cevi u odnosu na debljinu omotača, a prema literaturi [11] i [34] može se sa velikom tačnošću koristiti izraz za koeficijent prenosa toplote kao za ravan zid, (jednačina 6.27).

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{l_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.27)$$

gde je:

- α_1 - koeficijent prelaza toplote sa agensa sušenja na zid cevi sušare u $[W/m^2K]$,
- δ_1 - debljina zida cevi sušare u $[m]$,
- λ_1 - toplotna provodnost omotača-zida cevi sušare u $[W/mK]$,
- α_2 - koeficijent prelaza toplote sa omotača cevi sušare na okolni vazduh u $[W/m^2K]$.

Tako na primer, za prečnik cevi $d = 625$ mm i debljinu zida cevi $\delta_1 = 7.1$ mm, ako se određuje koeficijent prenosa toplote prema jednačini (6.27), greška iznosi 1% u odnosu na vrednost koeficijenta prenosa toplote, prema jednačini (6.26). Iz tih razloga može se primeniti jednostavniji oblik za ukupni koeficijent prenosa toplote, dat relacijom (6.27).

Koeficijent prelaza toplote zračenjem omotača cevi sušare (k_r)

U oblasti procesne tehnike koriste se uređaji kod kojih je jedno telo površine A_1 (na višoj temperaturi T_1) smešteno u prostor koji okružuje neko drugo telo površine A_2 (koja je znatno veća od površine A_1) i koje se nalazi na temperaturi $T_2 < T_1$. Kao primer uzima se dati slučaj pneumatske cevi sušare, koja se nalazi u prostoriji znatno veće površine. Između tih površina dolazi do razmene toplote zračenjem [30], [46].

Na osnovu jednačine za ukupno toplotno zračenje sa idealnog radijatora - crnog tela (Stefan, Boltzman):

$$dQ_r = \sigma T^4 dA \quad (6.28)$$

intenzitet prelaženja toplote zračenjam iznosi:

$$q_r = \sigma \epsilon_{rz} (T_z^4 - T_o^4) \quad [W/m^2] \quad (6.29)$$

Obzirom da važi relacija prema [46], [59]:

$$q_r = k_r (T_z - T_o) \quad [W/m^2] \quad (6.30)$$

koeficijent prenosa toplote zračenjem određuje se iz jednačine (6.29) i (6.30):

$$k_r = (T_z + T_o) (T_z^2 - T_o^2) \sigma \epsilon_{rz} \quad [W/m^2K] \quad (6.31)$$

gde su:

T_z, T_o - srednje temperature površine (T_z) zida cevi sušare i zidova omotača - prostorije u kojem se cev nalazi (T_o), u [K],

ϵ_{rz} - rezultatna emisiona karakteristika;

$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$ - Stefan - Boltzmanova konstanta.

Rezultatna emisiona karakteristika određuje se prema jednačini iz lit. [46]:

$$e_{rz} = \frac{1}{\frac{1}{e_z} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{e_o} - 1 \right)} \quad (6.32)$$

Obzirom da se okolina ponaša kao apsolutno crno telo, onda je $\epsilon_o = 1$, a kako se radi o razmeni toplote zračenjem između obuhvaćenih površina (cev sušare površine A_1 , nalazi se u omotaču - prostoriji površine A_2), pri čemu je $A_2 \gg A_1$; može se konstatovati da je: $\epsilon_{rz} \approx e_z$.

Imajući u vidu relaciju (6.31), gde figuriraju srednje temperature površine zida cevi sušare i omotača - zidova prostorije i da je razlika ovih temperatura relativno mala, obzirom da je cev sušare izolovana; to se mogu očekivati relativno male numeričke vrednosti koeficijenta prelaza toplote zračenjem (k_r).

6.2. Eksperimentalna istraživanja, rezultati i diskusija

Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja na eksperimentalnom postrojenju konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala utvrđen je koeficijent prenosa toplote, kao relevantan energetska parametar u procesu konvektivnog sušenja.

Koeficijent prenosa toplote određivan je na konvektivnoj pneumatskoj sušari, slika 3.1.

Merenje temperature agensa sušenja (smeše toplog vazduha i materijala), vršeno je u preseccima 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 i 5-5 pneumatske cevi sušare, prema šemi eksperimentalnog postrojenja slika 3.1. Merenja su vršena digitalnim termometrom opsega 0-1200°C, tačnosti $\pm 0,5$ % mernog opsega.

Na osnovu rezultata istraživanja energetskog bilansa i rezultata merenja temperature agensa sušenja, određen je ukupni koeficijent prenosa toplote konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala (tabela 6.2).

Tabela 6.2. Ukupni koeficijent prenosa toplote na konvektivnoj sušari sa pneumatskim transportom materijala.

| Ukupna količina toplote (toplotna snaga) Q_u [kW] | Zapremina cevi sušare V_k [m ³] | Površina suš. materijala ⁽¹⁾ A [m ²] | Srednja log. razlika temperature Dt_{sr} [°C] | Koeficijent prenosa toplote | |
|---|---|---|---|---|-------|
| | | | | k_v [W/m ³ K]; [W/m ² K] | k_u |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 2210 | 6,44 | 41,20 | 157 | 2186 | 342 |

⁽¹⁾ Prema lit. [11], uzima se kao unutrašnja površina cevi sušare.

U procesu eksperimentalnog sušenja na industrijskom postrojenju konvektivne pneumatske sušare slika 3.1 i geometrijskih karakteristika:

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

prečnik cevi sušare $D = 625 \text{ mm}$ i visina cevi sušare $H = 21 \text{ m}$, pri čemu je temperatura toplog vazduha $t_1 = 425 \text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura bridova $t_b = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, dobijen je ukupni koeficijent prenosa toplote $k_v = 2186 \text{ W/m}^3\text{K}$. Na osnovu toga moguće je izvršiti proračun sušara za odgovarajući kapacitet sušenja, obzirom na određenu numeričku vrednost koeficijenta prenosa toplote $k_u = 342 \text{ W/m}^2\text{K}$, prema tabeli 6.2.

Koeficijent prenosa toplote u dinamičkim uslovima rada sušare (neravnomerno doziranje sušenog materijala, oscilovanje početnog sadržaja vlage, temperature sušenja, toplotnog fluksa i dr.), zavisi od većeg broja različitih veličina koje karakterišu prelaženje toplote. Cilj ovog dela istraživanja je da se utvrdi karakter prenosa toplote kod ovako složenog dinamičkog modela, obzirom da prenos toplote obuhvata fenomen prenosa toplote konvekcijom, kondukcijom i radijacijom.

Na osnovu rezultata istraživanja i relacija datih jednačinama (6.10; 6.11; 6.12), određena je vrednost koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (tabela 6.3).

Tabela 6.3. Koeficijent prelaza toplote konvekcijom.

| Topl. snaga za isparavanje vode Q_w [kW] | Topl. snaga za zagrevanje materijala Q_s [kW] | Topl. snaga prelaza topl. konvekc. Q_{konv} [kW] | Površina A [m ²] | Sred. log. raz. temp. Dt_{sr} [°C] | Koeficijent prelaza toplote a [W/m ² K] |
|---|--|---|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1502 | 67 | 1569 | 41,20 | 157 | 242 |

Na osnovu jednačine (6.13; 6.21) određena je Rejnoldsovog i Nuseltovog broja, dato u tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Rejnoldsov broj i Nuseltov broj.

| Maseni protok vazduha G [kg/s m ²] | Prečnik cevi sušare d [m] | Dinamič. visk. vazduha $\mu \times 10^{-6}$ [kg/s m] | Rejnoldsov broj $Re \times 10^{-6}$ | Koeficijent prenosa toplote a [W/m ² K] | Termička provodnost vazduha λ_v [W/mK] | Nuseltov broj N_u |
|---|--------------------------------|---|--|---|---|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 16,90 | 0,625 | 34,05 | 0,31 | 242 | 5,34 | 28,32 |
| 16,90 | 0,625 | 31,09 | 0,34 | 242 | 4,86 | 31,12 |
| 16,90 | 0,625 | 26,73 | 0,39 | 242 | 4,07 | 37,16 |
| 16,90 | 0,625 | 23,97 | 0,44 | 242 | 3,60 | 42,01 |
| 16,90 | 0,625 | 22,38 | 0,47 | 242 | 3,27 | 46,25 |
| 16,90 | 0,625 | 27,64 | 0,39 | 242 | 4,23 | 36,97 |

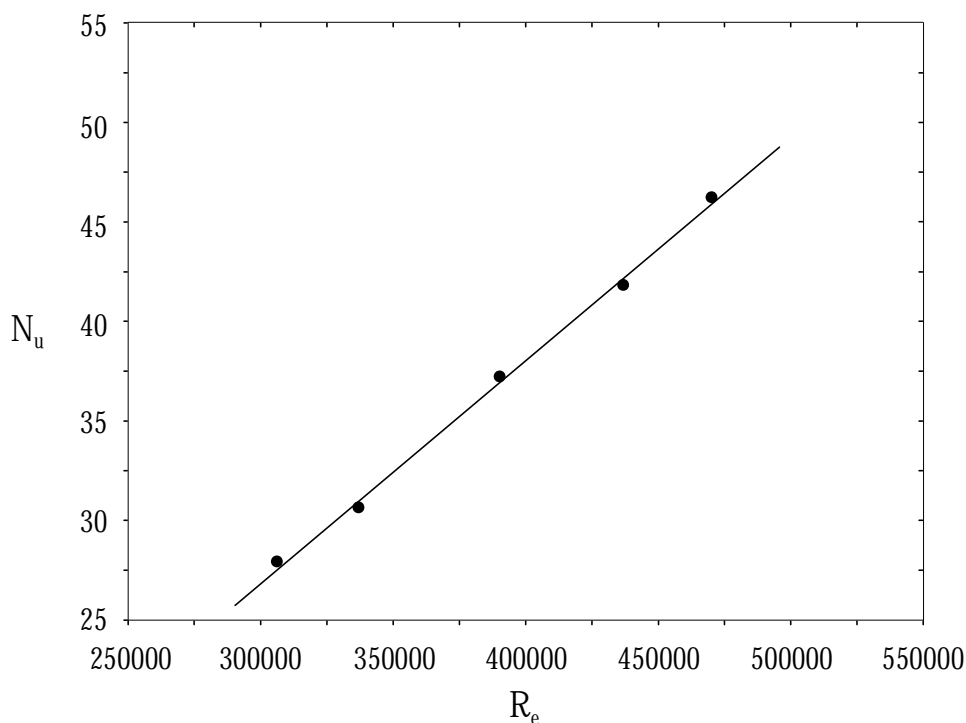
Primenom jednačine (6.20) na rezultate istraživanja date u tabeli 6.4. dobija se kriterijalna jednačina Nuseltovog tipa:

$$N_u = -6,385 + 0,00011 \cdot R_e \quad (6.33)$$

$$R = 0,995$$
$$SD = 1,020$$

Na osnovu relacije (6.33), rezultati eksperimentalnih i teorijskih istraživanja korelisani su odnosom Nuseltovog (N_u) i Rejnoldsovog (R_e) broja. Na osnovu toga povećanjem Rejnoldsovog broja usled povećanja brzine strujanja toplog vazduha - agensa sušenja, dolazi do povećanja Nuseltovog broja. Imajući u vidu jednačinu (6.13) i (6.19), dolazi pri tome i do povećanja koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (α).

Zavisnost promene Nuseltovog i Renoldsovog broja data je na slici 6.1.



Slika 6.1. Zavisnost promene Nuseltovog i Renoldsovog broja kod konvektne sušare sa pneumatskim transportom materijala ($d=625\text{mm}$, $H=21\text{m}$, $t_l/t_b=425^\circ/110^\circ\text{C}$).

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

Data relacija (6.33) najbolje koreliše rezultate eksperimentalnih i teorijskih istraživanja i predstavljena je na slici 6.1.

Imajući u vidu jednačinu (6.19), može se postaviti sledeća relacija za koeficijent prenosa toplote konvekcijom:

$$\alpha = (-6,385 + 0,00011 \cdot R_e) \cdot \frac{l_v}{d} \quad (6.34)$$

U tabeli 6.5 i 6.6, date su vrednosti koeficijenta prelaza toplote (α), za razne veličine Rejnoldsovog broja, koji pokriva brzine strujanja agensa sušenja, za različite prečnike cevi sušare: $d=625\text{mm}$ i $d=800\text{mm}$.

Tabela 6.5. Koeficijent prelaza toplote (α), za razne veličine Rejnoldsovog broja i prečnike cevi sušare $d=0,625\text{m}$.

| Rejnoldsov broj $R_e[-]$ | Temperatura vazduha $t[^\circ\text{C}]$ | Termička provodnost agensa sušenja $l_v[\text{W/m K}]$ | Prečnik cevi sušare $d[\text{m}]$ | Koeficijent prelaza toplote $\alpha [\text{W/m}^2\text{K}]$ |
|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 300.000 | 400 | 5,21 | 0,625 | 222 |
| 350.000 | 300 | 4,60 | 0,625 | 230 |
| 400.000 | 200 | 3,93 | 0,625 | 236 |
| 450.000 | 150 | 3,56 | 0,625 | 245 |
| 500.000 | 100 | 3,21 | 0,625 | 250 |
| 400.000 | 230 | 4,10 | 0,625 | 237 |

Tabela 6.6. Koeficijent prelaza toplote (α), za razne veličine Rejnoldsovog broja i prečnike cevi sušare $d=0,800\text{m}$.

| Rejnoldsov broj $R_e[-]$ | Temperatura vazduha $t[^\circ\text{C}]$ | Termička provodnost agensa sušenja $l_v[\text{W/m K}]$ | Prečnik cevi sušare $d[\text{m}]$ | Koeficijent prelaza toplote $\alpha [\text{W/m}^2\text{K}]$ |
|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 300.000 | 400 | 5,21 | 0,800 | 174 |
| 350.000 | 300 | 4,60 | 0,800 | 180 |
| 400.000 | 200 | 3,93 | 0,800 | 184 |
| 450.000 | 150 | 3,56 | 0,800 | 191 |
| 500.000 | 100 | 3,21 | 0,800 | 195 |
| 400.000 | 230 | 4,10 | 0,800 | 185 |

Primenom teorije korelacija, metode najmanjih kvadrata na rezultate eksperimentalnih i teoretskih istraživanja tabela 6.5 i tabela 6.6, dobijaju se fenomenološke jednačine zavisnosti koeficijenta prelaza toplote (α) i Rejnuldsovog broja (R_e).

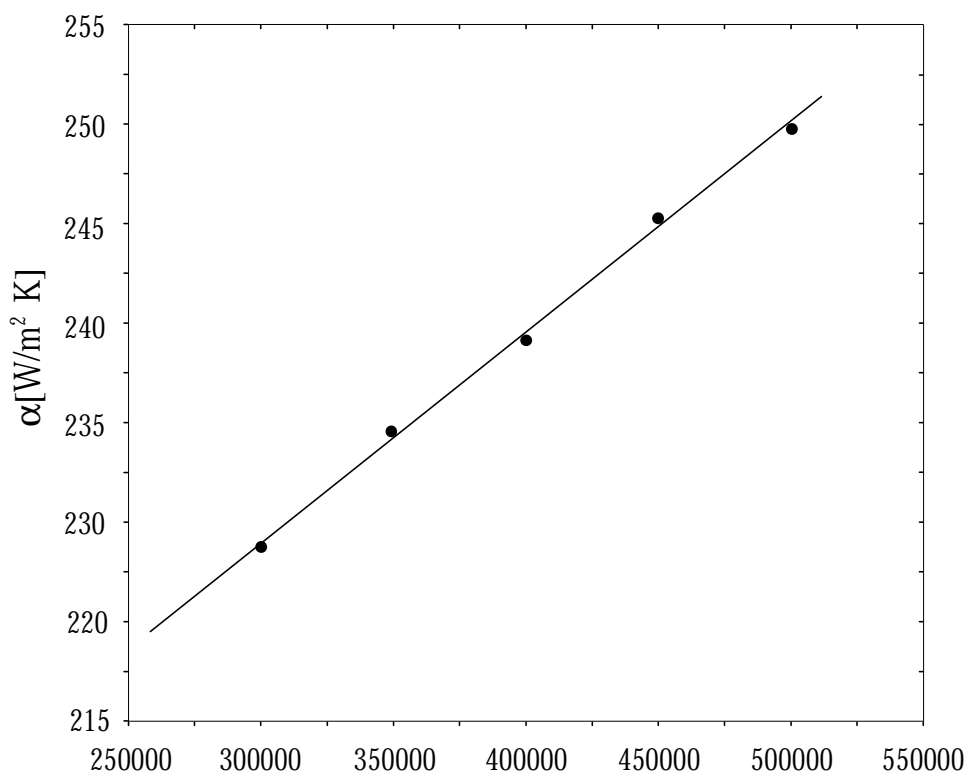
Empirijska jednačina zavisnosti promene koeficijenta prelaza toplote (α) i Rejnuldsovog broja (R_e) za prečnik cevi sušare $d=0,625m$, data je sledećm relacijom:

$$\alpha = 179,8 + 0,00014 \cdot R_e \quad (6.35)$$

$$R = 0,996$$

$$SD = 1,016$$

Ova zavisnost promene (α , R_e), data je na slici 6.2.



Slika 6.2. Zavisnost promene koeficijenta prelaza toplote i Rejnuldsovog broja za prečnik cevi sušare $d=0,625m$.

Empirijska jednačina zavisnosti promene koeficijenta prelaza toplote (α) i Rejnuldsovog broja (R_e), za prečnik cevi sušare $d=0,800m$, dato je sledećom relacijom:

$$\alpha = 142,4 + 0,000106 \cdot R_e \quad (6.36)$$

$$R = 0,996$$

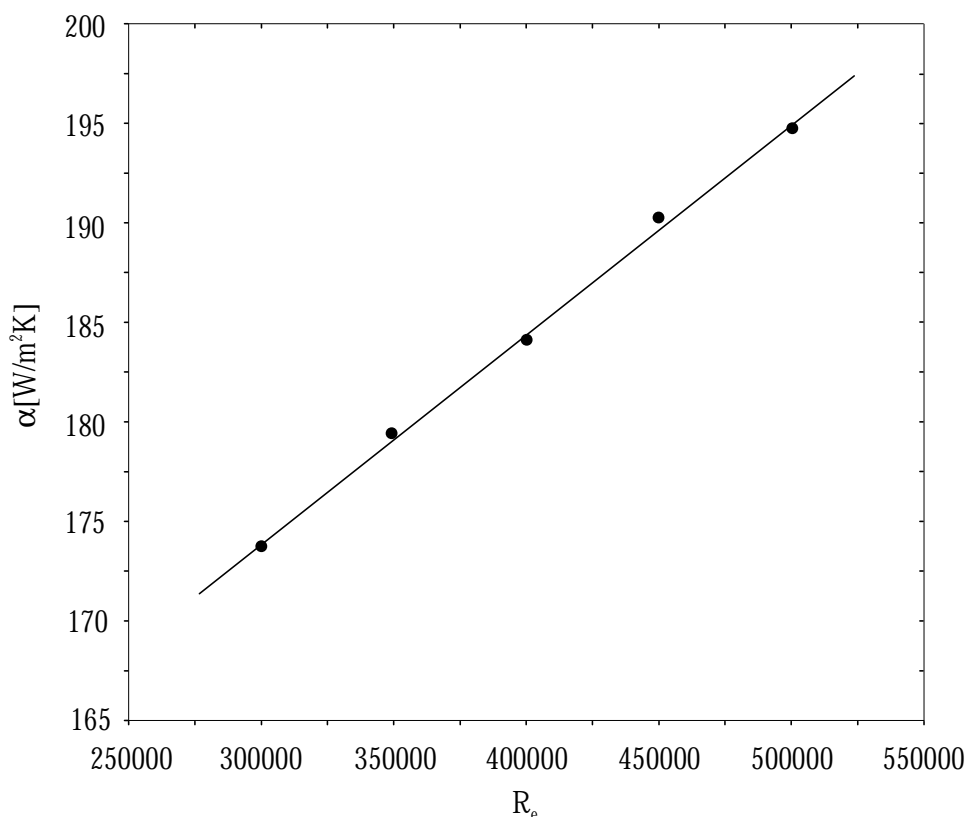
$$SD = 0,795$$

Ova zavisnost promene (α , R_e), data je na slici 6.3.

Na osnovu jednačine (6.34) i rezultata eksperimentalnih i teorijskih istraživanja, utvrđena je relacija za termički otpor konvektivnog prenosa toplote sa agensa sušenja-toplog vazduha na sušeni materijal u sledećem obliku:

$$R_a = \frac{d}{(-6,385 + 0,00011R_e)I_v} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (6.37)$$

Pri porastu vrednosti termičkog otpora konvektivnog prenosa toplote (R_a), dolazi do smanjenja koeficijenta prelaza toplote konvekcijom (α), a time ukupnog koeficijenta prenosa toplote (k_u).



Slika 6.3. Zavisnost promene koeficijenta prelaza toplote i Reynoldsovog broja za prečnik cevi sušare $d=0,800m$.

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

Na osnovu rezultata istraživanja energetskog bilansa u tabeli 6.7, dati su rezultati za koeficijent prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare.

Tabela 6.7. Koeficijent prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare.

| Toplotna snaga gubitaka sa izlaznim vazduhom Q_L [kW] | Površina A [m ²] | Temperaturska razlika Dt_{sr} [° C] | Koeficijent prel. topl. za topl. gubitke sa izlaznim vazduhom k_i [W/m ² K] |
|---|--|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 570 | 41,20 | 157 | 88 |

Na osnovu rezultata istraživanja dobijenih u tabeli 6.2, ukupni koeficijent prenosa toplote iznosi $k_u=342$ [W/m²K]. Koeficijent prelaza toplote za toplotne sa izlaznim vazduhom iz sušare prema rezultatima istraživanja dobijenih u tabeli 6.7, iznosi $k_i=88$ [W/m²K]. Koeficijent prelaza toplote konvekcijom $\alpha=242$ [W/m²K] dat je u tabeli 6.3.

Na osnovu jednačine (6.9) mogu se odrediti i koeficijenti prenosa toplote od provođenja kondukcije i zračenja, tabela 6.8. Na taj način određene su relativne numeričke vrednosti koeficijenta prenosa toplote.

Tabela 6.8. Numeričke vrednosti koeficijenata prenosa toplote.

| Ukupni koeficijent prenosa toplote k_u [W/m ² K] | Koeficijent prelaza toplote konvekcijom a [W/m ² K] | Koeficijent prel. topl. za topl. gubitke sa izlaznim vazduhom k_i [W/m ² K] | Koeficijent prenosa toplote od kondukcije i zračenja $(k_p + k_r)$ [W/m ² K] |
|---|--|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 342 | 242 | 88 | 12 |

U tabeli 6.9 i tabeli 6.10, date su numeričke vrednosti koeficijenata prelaza toplote (α) za različite veličine Reynoldsovog broja ($300.000 < Re < 500.000$), za prečnike pneumatske cevi sušare: 625 mm i 800 mm. Veličine u tabelama (6.9) i (6.10) određene su prema korelacionoj jednačini (6.35) i (6.36).

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

Tabela 6.9 Vrednosti koeficijenata prelaza toplote konvekcijom (α) za različite veličine Reynoldsovog broja, prema jednačini (6.35), za prečnik cevi sušare $D=625\text{mm}$.

| Re [-] | α [W/m ² K] | Re [-] | α [W/m ² K] |
|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 300.000 | 221,800 | 335.000 | 226,700 |
| 301.000 | 221,940 | 336.000 | 226,840 |
| 302.000 | 222,080 | 337.000 | 226,980 |
| 303.000 | 222,220 | 338.000 | 227,120 |
| 304.000 | 222,360 | 339.000 | 227,260 |
| 305.000 | 222,500 | 340.000 | 227,400 |
| 306.000 | 222,640 | 341.000 | 227,540 |
| 307.000 | 222,780 | 342.000 | 227,680 |
| 308.000 | 222,920 | 343.000 | 227,820 |
| 309.000 | 223,060 | 344.000 | 227,960 |
| 310.000 | 223,200 | 345.000 | 228,100 |
| 311.000 | 223,340 | 346.000 | 228,240 |
| 312.000 | 223,480 | 347.000 | 228,380 |
| 313.000 | 223,620 | 348.000 | 228,520 |
| 314.000 | 223,760 | 349.000 | 228,660 |
| 315.000 | 223,900 | 350.000 | 228,800 |
| 316.000 | 224,040 | 351.000 | 228,940 |
| 317.000 | 224,180 | 352.000 | 229,080 |
| 318.000 | 224,320 | 353.000 | 229,220 |
| 319.000 | 224,460 | 354.000 | 229,360 |
| 320.000 | 224,600 | 355.000 | 229,500 |
| 321.000 | 224,740 | 356.000 | 229,640 |
| 322.000 | 224,880 | 357.000 | 229,780 |
| 323.000 | 225,020 | 358.000 | 229,920 |
| 324.000 | 225,160 | 359.000 | 230,060 |
| 325.000 | 225,300 | 360.000 | 230,200 |
| 326.000 | 225,440 | 361.000 | 230,340 |
| 327.000 | 225,580 | 362.000 | 230,480 |
| 328.000 | 225,720 | 363.000 | 230,620 |
| 329.000 | 225,860 | 364.000 | 230,760 |
| 330.000 | 226,000 | 365.000 | 230,900 |
| 331.000 | 226,140 | 366.000 | 231,040 |
| 332.000 | 226,280 | 367.000 | 231,180 |
| 333.000 | 226,420 | 368.000 | 231,320 |
| 334.000 | 226,560 | 369.000 | 231,460 |

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

| Re [-] | a [W/m ² K] | Re [-] | a [W/m ² K] |
|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 370.000 | 231,600 | 405.000 | 236,500 |
| 371.000 | 231,740 | 406.000 | 236,640 |
| 372.000 | 231,880 | 407.000 | 236,780 |
| 373.000 | 232,020 | 408.000 | 236,920 |
| 374.000 | 232,160 | 409.000 | 237,060 |
| 375.000 | 232,300 | 410.000 | 237,200 |
| 376.000 | 232,440 | 411.000 | 237,340 |
| 377.000 | 232,580 | 412.000 | 237,480 |
| 378.000 | 232,720 | 413.000 | 237,620 |
| 379.000 | 232,860 | 414.000 | 237,760 |
| 380.000 | 233,000 | 415.000 | 237,900 |
| 381.000 | 233,140 | 416.000 | 238,040 |
| 382.000 | 233,280 | 417.000 | 238,180 |
| 383.000 | 233,420 | 418.000 | 238,320 |
| 384.000 | 233,560 | 419.000 | 238,460 |
| 385.000 | 233,700 | 420.000 | 238,600 |
| 386.000 | 233,840 | 421.000 | 238,740 |
| 387.000 | 233,980 | 422.000 | 238,880 |
| 388.000 | 234,120 | 423.000 | 239,020 |
| 389.000 | 234,260 | 424.000 | 239,160 |
| 390.000 | 234,400 | 425.000 | 239,300 |
| 391.000 | 234,540 | 426.000 | 239,440 |
| 392.000 | 234,680 | 427.000 | 239,580 |
| 393.000 | 234,820 | 428.000 | 239,720 |
| 394.000 | 234,960 | 429.000 | 239,860 |
| 395.000 | 235,100 | 430.000 | 240,000 |
| 396.000 | 235,240 | 431.000 | 240,140 |
| 397.000 | 235,380 | 432.000 | 240,280 |
| 398.000 | 235,520 | 433.000 | 240,420 |
| 399.000 | 235,660 | 434.000 | 240,560 |
| 400.000 | 235,800 | 435.000 | 240,700 |
| 401.000 | 235,940 | 436.000 | 240,840 |
| 402.000 | 236,080 | 437.000 | 240,980 |
| 403.000 | 236,220 | 438.000 | 241,120 |
| 404.000 | 236,360 | 439.000 | 241,260 |

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

| Re [-] | a [W/m ² K] | Re [-] | a [W/m ² K] |
|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 440.000 | 231,600 | 475.000 | 236,500 |
| 441.000 | 231,740 | 476.000 | 236,640 |
| 442.000 | 231,880 | 477.000 | 236,780 |
| 443.000 | 232,020 | 478.000 | 236,920 |
| 444.000 | 232,160 | 479.000 | 237,060 |
| 445.000 | 232,300 | 480.000 | 237,200 |
| 446.000 | 232,440 | 481.000 | 237,340 |
| 447.000 | 232,580 | 482.000 | 237,480 |
| 448.000 | 232,720 | 483.000 | 237,620 |
| 449.000 | 232,860 | 484.000 | 237,760 |
| 450.000 | 233,000 | 485.000 | 237,900 |
| 451.000 | 233,140 | 486.000 | 238,040 |
| 452.000 | 233,280 | 487.000 | 238,180 |
| 453.000 | 233,420 | 488.000 | 238,320 |
| 454.000 | 233,560 | 489.000 | 238,460 |
| 455.000 | 233,700 | 490.000 | 238,600 |
| 456.000 | 233,840 | 491.000 | 238,740 |
| 457.000 | 233,980 | 492.000 | 238,880 |
| 458.000 | 234,120 | 493.000 | 239,020 |
| 459.000 | 234,260 | 494.000 | 239,160 |
| 460.000 | 234,400 | 495.000 | 239,300 |
| 461.000 | 234,540 | 496.000 | 239,440 |
| 462.000 | 234,680 | 497.000 | 239,580 |
| 463.000 | 234,820 | 498.000 | 239,720 |
| 464.000 | 234,960 | 499.000 | 239,860 |
| 465.000 | 235,100 | 500.000 | 240,000 |
| 466.000 | 235,240 | 501.000 | 240,140 |
| 467.000 | 235,380 | 502.000 | 240,280 |
| 468.000 | 235,520 | 503.000 | 240,420 |
| 469.000 | 235,660 | 504.000 | 240,560 |
| 470.000 | 235,800 | 505.000 | 240,700 |
| 471.000 | 235,940 | 506.000 | 240,840 |
| 472.000 | 236,080 | 507.000 | 240,980 |
| 473.000 | 236,220 | 508.000 | 241,120 |
| 474.000 | 236,360 | 509.000 | 241,260 |

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

Tabela 6.10 Vrednosti koeficijenata prelaza toplote konvekcijom (α) za različite veličine Reynoldsovog broja, prema jednačini (6.36), za prečnik cevi sušare $D=800\text{mm}$.

| Re [-] | α [W/m ² K] | Re [-] | α [W/m ² K] |
|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 300.000 | 190,400 | 335.000 | 196,000 |
| 301.000 | 190,560 | 336.000 | 196,160 |
| 302.000 | 190,720 | 337.000 | 196,320 |
| 303.000 | 190,880 | 338.000 | 196,480 |
| 304.000 | 191,040 | 339.000 | 196,640 |
| 305.000 | 191,200 | 340.000 | 196,800 |
| 306.000 | 191,360 | 341.000 | 196,960 |
| 307.000 | 191,520 | 342.000 | 197,120 |
| 308.000 | 191,680 | 343.000 | 197,280 |
| 309.000 | 191,840 | 344.000 | 197,440 |
| 310.000 | 192,000 | 345.000 | 197,600 |
| 311.000 | 192,160 | 346.000 | 197,760 |
| 312.000 | 192,320 | 347.000 | 197,920 |
| 313.000 | 192,480 | 348.000 | 198,080 |
| 314.000 | 192,640 | 349.000 | 198,240 |
| 315.000 | 192,800 | 350.000 | 198,400 |
| 316.000 | 192,960 | 351.000 | 198,560 |
| 317.000 | 193,120 | 352.000 | 198,720 |
| 318.000 | 193,280 | 353.000 | 198,880 |
| 319.000 | 193,440 | 354.000 | 199,040 |
| 320.000 | 193,600 | 355.000 | 199,200 |
| 321.000 | 193,760 | 356.000 | 199,360 |
| 322.000 | 193,920 | 357.000 | 199,520 |
| 323.000 | 194,080 | 358.000 | 199,680 |
| 324.000 | 194,240 | 359.000 | 199,840 |
| 325.000 | 194,400 | 360.000 | 200,000 |
| 326.000 | 194,560 | 361.000 | 200,160 |
| 327.000 | 194,720 | 362.000 | 200,320 |
| 328.000 | 194,880 | 363.000 | 200,480 |
| 329.000 | 195,040 | 364.000 | 200,640 |
| 330.000 | 195,200 | 365.000 | 200,800 |
| 331.000 | 195,360 | 366.000 | 200,960 |
| 332.000 | 195,520 | 367.000 | 201,120 |
| 333.000 | 195,680 | 368.000 | 201,280 |
| 334.000 | 195,840 | 369.000 | 201,440 |

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

| Re [-] | a [W/m ² K] | Re [-] | a [W/m ² K] |
|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 370.000 | 201,600 | 405.000 | 207,200 |
| 371.000 | 201,760 | 406.000 | 207,360 |
| 372.000 | 201,920 | 407.000 | 207,520 |
| 373.000 | 202,080 | 408.000 | 207,680 |
| 374.000 | 202,240 | 409.000 | 207,840 |
| 375.000 | 202,400 | 410.000 | 208,000 |
| 376.000 | 202,560 | 411.000 | 208,160 |
| 377.000 | 202,720 | 412.000 | 208,320 |
| 378.000 | 202,880 | 413.000 | 208,480 |
| 379.000 | 203,040 | 414.000 | 208,640 |
| 380.000 | 203,200 | 415.000 | 208,800 |
| 381.000 | 203,360 | 416.000 | 208,960 |
| 382.000 | 203,520 | 417.000 | 209,120 |
| 383.000 | 203,680 | 418.000 | 209,280 |
| 384.000 | 203,840 | 419.000 | 209,440 |
| 385.000 | 204,000 | 420.000 | 209,600 |
| 386.000 | 204,160 | 421.000 | 209,760 |
| 387.000 | 204,320 | 422.000 | 209,920 |
| 388.000 | 204,480 | 423.000 | 210,080 |
| 389.000 | 204,640 | 424.000 | 210,240 |
| 390.000 | 204,800 | 425.000 | 210,400 |
| 391.000 | 204,960 | 426.000 | 210,560 |
| 392.000 | 205,120 | 427.000 | 210,720 |
| 393.000 | 205,280 | 428.000 | 210,880 |
| 394.000 | 205,440 | 429.000 | 211,040 |
| 395.000 | 205,600 | 430.000 | 211,200 |
| 396.000 | 205,760 | 431.000 | 211,360 |
| 397.000 | 205,920 | 432.000 | 211,520 |
| 398.000 | 206,080 | 433.000 | 211,680 |
| 399.000 | 206,240 | 434.000 | 211,840 |
| 400.000 | 206,400 | 435.000 | 212,000 |
| 401.000 | 206,560 | 436.000 | 212,160 |
| 402.000 | 206,720 | 437.000 | 212,320 |
| 403.000 | 206,880 | 438.000 | 212,480 |
| 404.000 | 207,040 | 439.000 | 212,640 |

6. Koeficijenti i modeli prenosa toplote sa numeričkim pokazateljima

| Re [-] | a [W/m ² K] | Re [-] | a [W/m ² K] |
|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 440.000 | 212,800 | 475.000 | 218,400 |
| 441.000 | 212,960 | 476.000 | 218,560 |
| 442.000 | 213,120 | 477.000 | 218,720 |
| 443.000 | 213,280 | 478.000 | 218,880 |
| 444.000 | 213,440 | 479.000 | 219,040 |
| 445.000 | 213,600 | 480.000 | 219,200 |
| 446.000 | 213,760 | 481.000 | 219,360 |
| 447.000 | 213,920 | 482.000 | 219,520 |
| 448.000 | 214,080 | 483.000 | 219,680 |
| 449.000 | 214,240 | 484.000 | 219,840 |
| 450.000 | 214,400 | 485.000 | 220,000 |
| 451.000 | 214,560 | 486.000 | 220,160 |
| 452.000 | 214,720 | 487.000 | 220,320 |
| 453.000 | 214,880 | 488.000 | 220,480 |
| 454.000 | 215,040 | 489.000 | 220,640 |
| 455.000 | 215,200 | 490.000 | 220,800 |
| 456.000 | 215,360 | 491.000 | 220,960 |
| 457.000 | 215,520 | 492.000 | 221,120 |
| 458.000 | 215,680 | 493.000 | 221,280 |
| 459.000 | 215,840 | 494.000 | 221,440 |
| 460.000 | 216,000 | 495.000 | 221,600 |
| 461.000 | 216,160 | 496.000 | 221,760 |
| 462.000 | 216,320 | 497.000 | 221,920 |
| 463.000 | 216,480 | 498.000 | 222,080 |
| 464.000 | 216,640 | 499.000 | 222,240 |
| 465.000 | 216,800 | 500.000 | 222,400 |
| 466.000 | 216,960 | 501.000 | 222,560 |
| 467.000 | 217,120 | 502.000 | 222,720 |
| 468.000 | 217,280 | 503.000 | 222,880 |
| 469.000 | 217,440 | 504.000 | 223,040 |
| 470.000 | 217,600 | 505.000 | 223,200 |
| 471.000 | 217,760 | 506.000 | 223,360 |
| 472.000 | 217,920 | 507.000 | 223,520 |
| 473.000 | 218,080 | 508.000 | 223,680 |
| 474.000 | 218,240 | 509.000 | 223,840 |

Ukupni koeficijent prenosa toplote $k_u=342$ [W/m²K] je složeni koeficijent prenosa toplote, kao što je to dato jednačinom (6.9). Najveća količina toplote pri sušenju troši se na zagrevanje sušenog materijala i isparavanje vode prema relaciji (6.10) i (6.11). Na osnovu toga koeficijent prelaza toplote konvekcijom $\alpha=242$ [W/m² K] u složenim uslovima rada sušare, zavisi od raznih veličina koje karakterišu prelaženje toplote. Ove veličine su toplotni fluks, površina sušenja, temperaturska razlika i dr. Da bi se utvrdili efekti prenosa toplote pri konvektivnom sušenju, razmatrana je i problematika gubitaka toplote. Na osnovu toga određen je kao posebna veličina i koeficijent prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom $k_i=88$ [W/m²K]. U cilju određivanja baznih parametara prenosa toplote pri konvektivnom sušenju utvrđena je i vrednost koeficijenta prenosa toplote od kondukcije i zračenja $k_p+k_r=12$ [W/m² K]. Ovako relativno mala vrednost dobijena je, obzirom da je pneumatska cev sušare izolovana u cilju što manjih gubitaka toplote u okolinu.

7. NUMERIČKI POKAZATELJI REŽIMA SUŠENJA

| | |
|-------------------------------|----|
| 7.1. Parametri režima sušenja | 93 |
| 7.2. Optimalni režim sušenja | 94 |

7. NUMERIČKI POKAZATELJI REŽIMA SUŠENJA

U cilju utvrđivanja optimalnog režima sušenja korišćeni su eksperimentalni podaci sa industrijaskog postrojenja pneumatske sušare slika 3.1.

Optimalni režim sušenja podrazumeva dobar kvalitet sušenog materijala, optimalnu potrošnju energije i pri tom odgovarajući kapacitet sušenja.

Iz tih razloga se režim sušenja najbolje može ustanoviti na osnovu eksperimentalnih rezultata istraživanja u radnim uslovima sušare.

7.1. Parametri režima sušenja

Izbor odgovarajućeg režima sušenja ima veliki značaj, jer se njime utiče na: kvalitet osušenog proizvoda, potrošnju energije i kapacitet sušenja.

Uticajni parametri na režim sušenja su:

1. Temperatura agensa sušenja (toplog vazduha)

2. Veličina početne i krajnje vlažnosti materijala
3. Masa vlažnog materijala
4. Brzina sušenja
5. Vreme sušenja i dr.

Temperatura agensa sušenja (toplog vazduha) zavisi od svojstva materijala i sposobnosti sušenog materijala da u kratkom vremenskom periodu sušenja podnese visoke temperature sušenja.

Najveći uticaj na kvalitet osušenog materijala ima temperatura u procesu sušenja. Povećanjem temperature može se skratiti vreme sušenja. Režim sušenja je odabran tako da je temperatura agensa sušenja na početku sušenja iznosila $t_1 = 425 \text{ }^\circ\text{C}$ a na kraju sušenja $t_b = 110 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ovo je imalo povoljan uticaj na kvalitet sušenog materijala tako da je dobijen kvalitetan sušeni materijal sa srednjim sadržajem vlage $w_2=12\%$.

7.2. Optimalni režim sušenja

Pri optimalnom režimu sušenja cilj je da se dobije dobar kvalitet sušenog materijala pri optimalnoj specifičnoj potrošnji energije i tehničkom kapacitetu sušenja.

U tabeli 7.1. dat je optimalni režim sušenja na konvektivnoj pneumatskoj sušari.

Povećanjem temperature sušenja, dolazi do porasta intenziteta sušenja. Ovaj uticaj je naročito izražen u prvom periodu sušenja. Dozvoljena temperatura agensa sušenja zavisi od svojstava materijala, da u kratkom vremenskom periodu sušenja podnese višu temperaturu. Izbor temperaturnog režima zavisi i od uslova sušenja. U cilju skraćivanja vremena sušenja treba težiti povećanju temperature agensa sušenja, ali u dozvoljenim granicama. Da bi se izbeglo nekvalitetno sušenje, agens sušenja treba da ima stalnu temperaturu.

Tabela 7.1. Optimalni režim sušenja na konvektivnoj pneumatskoj sušari.

| R. broj | Naziv | Oznake i dimenzije | Vrednost |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Početna vlaga materijala | w_1 [%] | 30 |
| 2 | Krajnja vlaga materijala | w_2 [%] | 12 |
| 3 | Vreme sušenja | τ [s] | 1,616 |
| 4 | Temperatura okoline | t_a [°C] | 20 |
| 5 | Masa vlažnog materijala | m_1 [kg/h] | 9920 |
| 6 | Masa suvog materijala | m_2 [kg/h] | 1640 |
| 7 | Masa isparele vode | W [kg/h] | 2030 |
| 8 | Temperatura sušenja | t_1 [°C] | 425 |
| 9 | Temperatura bridova | t_b [°C] | 110 |
| 10 | Koeficijent prenosa toplote | k_v [W/m ³ K] | 2186 |
| | | k_u [W/m ² K] | 342 |
| 11 | Specifična potrošnja energije | q [kJ/kgH ₂ O] | 3918 |
| 12 | Termički stepen iskorišćenja | η [-] | 0,74 |

Eksperimentalno sušenje obavljeno je pri temperaturi agensa sušenja od 425°C na ulazu u sušaru i temperaturi bridova na izlazu iz sušare od 110 °C. Pri tome je ostvarena specifična potrošnja energije, koja je iznosila 3918 kJ/ kgH₂O, što predstavlja optimalnu potrošnju u poređenju sa [3],[11] i [22]. Imajući u vidu ostvareno minimalno vreme sušenja i dobar kvalitet sušenog materijala, može se zaključiti da je u datim uslovima ostvaren optimalni režim sušenja.

Režim sušenja je odabran tako, da je uticaj pojedinih parametara na krajnje osobine materijala, povoljan po pitanju dobrih tehnoloških svojstava i kvaliteta proizvoda. Tako je srednji sadržaj vlage sušenog materijala nakon sušenja iznosio 12%. Imajući u vidu da je pri tome postignut tehnički kapacitet sušenja od 1640 kg/h, osušenog materijala, pri optimalnoj specifičnoj potrošnji energije, može se zaključiti da je ostvaren optimalni režim sušenja.

ZAKLJUČAK

U okviru ove disertacije izvršena su teorijska i eksperimentalna istraživanja mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju. Takođe su utvrđeni numerički pokazatelji relevantnih parametara sušenja.

Eksperimentalna istraživanja su izvršena na postrojenju konvektivne pneumatske sušare, prečnika cevi $D = 625$ [mm], visine pneumatske cevi $H = 21$ [m] i instalisane toplotne snage sušenja $Q = 3,4$ [MW].

U disertaciji su definisane i određene relevantne veličine procesa sušenja, parametri i relacije energetske karakteristika i mehanizama prenosa toplote:

- Modeli krivih kinetike sušenja i numerički pokazatelji.
- Energetski bilans konvektivne pneumatske sušare sa numeričkim pokazateljima.
- Modeli i kriterijalne jednačine prenosa toplote.
- Koeficijenti prenosa toplote, sa numeričkim pokazateljima.
- Numerički pokazatelji optimalnog režima sušenja i dr.

Na osnovu eksperimentalnih i teorijskih istraživanja utvrđene su sledeće empirijske jednačine i numerički pokazatelji:

- jednačina zavisnosti vlažnosti materijala od vremena sušenja:

$$w = 29,88 - 22,20 \tau + 7,00 \tau^2$$

- jednačina zavisnosti brzine sušenja od vremena sušenja:

$$dw/d\tau = 30,90 - 28,67 \tau + 7,50 \tau^2$$

- jednačina temperaturske krive sušenja:

$$t = 432 - 293,45 \tau + 56,45 \tau^2$$

- jednačina zavisnosti promene vlažnosti materijala i temperature sušenja:

$$w = 12,43 - 0,0133 t + 1,268 t^2$$

- jednačina zavisnosti brzine sušenja i vlažnosti materijala:

$$dw/d\tau = -32,35 + 4,05 w - 0,074 w^2$$

- kriterijalna jednačina prenosa toplote Nuseltovog tipa:

$$Nu = - 6,385 + 0,00011Re$$

- korelaciona jednačina za koeficijent prenosa toplote konvekcijom:

$$\alpha = (-6,385 + 0,00011Re) \frac{I_v}{d}$$

- korelaciona jednačina za termički otpor konvektivnog prenosa toplote sa agensa sušenja na sušeni materijal:

$$R_a = \frac{d}{(-6,385 + 0,00011R_e)I_v}$$

- u tabeli (6.5), date su vrednosti koeficijenta prelaza toplote za različite vrednosti Rejnoldsovog broja ($300.000 < Re < 500.000$) i prečnik cevi sušare $D=0,625$ [m]; na osnovu toga data je korelaciona jednačina prenosa toplote:

$$\alpha = 179,8 + 0,00014Re$$

- u tabeli (6.6), date su vrednosti koeficijenta prelaza toplote za različite vrednosti Rejnoldsovog broja ($300.000 < Re < 500.000$) i prečnik cevi sušare $D=0,800$ [m]; na osnovu toga data je korelaciona jednačina prenosa toplote:

$$\alpha = 142,4 + 0,000106Re$$

Eksperimentalni rezultati i njihova analiza omogućuju izvođenje sledećih zaključaka:

U početnom periodu sušenja tzv. prvi period sušenja zavisnost promene vlage i vremena sušenja ima približno linearan karakter. Ovo odgovara vremenskom periodu sušenja $\tau = (0-0,75)$ [s], sa konstantnom brzinom sušenja. Drugi period sušenja u vremenskom intervalu $\tau = (0,75-1,616)$ [s], opisan je polinomom drugog reda. Sušenje se završava sa ravnotežnim sadržajem vlage $w_2 = 12$ [%].

U periodu konstantne brzine sušenja tj. prvi period, sva toplota dovedena materijalu troši se na intenzivno isparavanje površinske vlage. Sa smanjenjem sadržaja vlage, brzina isparavanja vlage opada. Proces sušenja odvija se brzinom koja zavisi od oblika veze vlage s materijalom i mehanizma premeštanja vlage u njemu. U periodu opadajuće brzine sušenja, tj. drugi period, isparavanje vlage iz materijala se smanjuje. Kada se vlažnost materijala smanji na ravnotežnu vlažnost, brzina isparavanja vlage iznosi $dw/d\tau=5$ [%/s]. Smanjenjem vlažnosti materijala i porastom vremena sušenja dolazi do smanjenja brzine isparavanja.

U procesu eksperimentalnog sušenja pri pneumatskom transportu materijala dobijen je relativno mali stepen koncentracije materijala $c_k = 0,530$, pa se za približne proračune pada pritiska u sušari može smatrati kao da je u pitanju transport čistog agensa sušenja.

Na osnovu analize energetskog bilansa utvrđena je toplotna snaga sušenja $Q = 2210$ [kW], specifična potrošnja energije $q = 3918$ [kJ/kgH₂O], kao i termički stepen iskorišćenja $\eta_t = 0,74$.

Energetski bilans sušare može poslužiti pri oceni energetskog stanja sušare, kao i za razmatranje mogućnosti racionalne potrošnje energije.

Značajan deo energije pri sušenju, usmerava se na predaju toplote materijalu, neophodnu za isparavanje vlage i toplotu za kidanje sila veze vlage sa osnovom sušenog materijala.

Specifična potrošnja energije i kvalitet osušenog materijala su osnovni pokazatelji koji karakterišu rezultate sušenja na konvektivnoj sušari. Praćenjem i kontrolom ovih parametara u procesu sušenja obezbeđuje se optimalna potrošnja energije i kvalitet sušenog materijala.

Na osnovu rezultata istraživanja energetskog bilansa i rezultata merenja temperature agensa sušenja utvrđen je ukupni koeficijent prenosa toplote konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala u iznosu od: $k_u = 342$ [W/m²K]; odnosno $k_v = 2186$ [W/m³K]. Koeficijent prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom iz sušare, prema rezultatima istraživanja datim u tabeli (6.7), iznosi: $k_i = 88$ [W/m²K]. Koeficijent prelaza toplote konvekcijom sa agensa sušenja na sušeni materijal, dat je u tabeli (6.3), i on iznosi: $\alpha = 242$ [W/m²K]. Koeficijent prenosa toplote od provođenja - kondukcije i zračenja iznosi: $k_p + k_r = 12$ [W/m²K], ovako relativno male vrednosti dobijene su obzirom da je cev sušare izolovana.

Dominantan uticaj na vrednost ukupnog koeficijenta prenosa toplote (k_u), ima koeficijent prenosa toplote konvekcijom (α). Dati uticaj ispoljava se preko termičkog otpora prenosa toplote (R_α).

Koeficijent prelaza toplote konvekcijom (α), u dinamičkim uslovima rada sušare, zavisi od niza različitih veličina, koje karakterišu prelaženje toplote. Te veličine su površina sušenja, temperaturska razlika i toplotni fluks. Efekti gubitaka toplote pri sušenju iskazani su putem posebne veličine tzv. koeficijenta prelaza toplote za toplotne gubitke sa izlaznim vazduhom (k_i) i koeficijenta prenosa toplote kondukcijom i zračenjem (k_p+k_r). Na taj način utvrđeni su efekti prenosa toplote i bazni parametri prenosa toplote.

Takođe su određeni tj. utvrđeni i drugi relevantni parametri procesa sušenja:

Masa vlažnog materijala $m_1 = 9920$ [kg/h],

Masa suvog materijala $m_2 = 1640$ [kg/h],

Masa isparele vode $W = 2030$ [kg/h],

Količina vazduha za sušenje $V_L = 14350$ [m³/h],

Potrošnja prirodnog gasa $V_G = 250$ [m³/h],

Specifična količina isparele vode $m_v=315$ [kgH₂O/(m³/h)];

$m_A=49$

[kgH₂O/(m²h)], kao i drugi relevantni parametri procesa sušenja.

Na osnovu rezultata istraživanja energetskog bilansa poglavlja 5.3, povećanje kapaciteta sušare sa 280×10^3 kg/dan, na 350×10^3 kg/dan - (dnevne prerade kukuruznog zrna), moguće je ostvariti u sledećim slučajevima:

- povećanjem prečnika cevi sušare $D_1=625$ [mm] na prečnik $D_2=800$ [mm], pri zadržavanju prvobitne visine cevi sušare $H=21$ [m];
- povećanjem visine cevi sušare $H_1= 21$ [m] na visinu $H_2=26$ [m], pri konstantnom prečniku cevi $D= 625$ [mm]. Promenom visine cevi sušare produžava se vreme sušenja sa $\tau_1 =1,616$ [s], na $\tau_2 = 2$ [s], pri tome dolazi do promene u režimu sušenja obzirom da se temperatura agensa sušenja na ulazu u sušaru povećava sa 425 [°C] na 525 [°C].

U toku eksperimentalnog sušenja na industrijskom postrojenju sl.3.1, utvrđeni su parametri optimalnog režima sušenja i to:

| | |
|---------------------------------------|--------------------|
| Početna vlaga materijala | $w_1=30$ [%] |
| Krajnja vlaga materijala | $w_2 =12$ [%] |
| Vreme sušenja | $\tau = 1,616$ [s] |
| Temperatura agensa sušenja | $t_1= 425$ [°C] |
| Temperatura bridova - izlaz iz sušare | $t_b= 110$ [°C] |

kao i dr. veličine režima date u tabeli 7.1.

Najveći uticaj na kvalitet osušenog materijala i brzinu sušenja ima temperatura u procesu sušenja. Režim sušenja je odabran tako da je uticaj pojedinih parametara režima sušenja na krajnje osobine materijala povoljan po pitanju dobrih tehnoloških svojstava i kvaliteta proizvoda.

U konačnom postavljanju sistema jednačina energetskog bilansa i modela prenosa toplote koristio se pristup klasične termodinamike. Na taj način zaobišao se problem iskazivanja potencijala prostiranja vlage. Određeni su toplotni fluksevi kao i numeričke vrednosti koeficijenata prenosa toplote. Na taj načina dat je noviji pristup teoriji sušenja, koji se čini zadnjih petnaest godina.

Dobijeni rezultati istraživanja baziraju se na eksperimentalnim podacima sa industrijskog postrojenja sušare. Na osnovu toga rezultati istraživanja imaju upotrebnu vrednost, tj. mogu korisno poslužiti projektantima, proizvođačima i korisnicima ovih i sličnih sistema sušenja, kao i za edukativne svrhe.

Rezultati istraživanja mogu poslužiti takođe za: određivanje zavisnosti i parametara prenosa toplote pri konvektivnom sušenju, kao i pri projektovanju i razvoju konvektivnih sušara.

Teorjska i eksperimentalna istraživanja relevantnih parametara prenosa toplote imala su za cilj iznalaženje modela i potpunije energetsko opisivanje problematike konvektivnog sušenja, u cilju dopune dosadašnjih saznanja, na ovakvim i sličnim sistemima sušenja.

SPISAK OZNAKA

- \dot{m}_{w_n} - materijalni fluks, masa količine vlage [$kgH_2O/(m^2 \cdot s)$];
- $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ - skalarna veličina gradijenta potencijala prostiranja vlage;
- I_w - materijalna provodnost (provodnost vlage) u vlažnom materijalu;
- \dot{q}_n - rezultujući termički fluks kroz jedinicu izotermne površine u pravcu normale na nju [W/m^2];
- l - termička provodnost vlažnog materijala [$W/(mK)$];
- i_w - specifična entalpija vlage, [J/kg];
- N - brzina sušenja [$kg H_2O/m^2s$];
- β_w - koeficijent prenosa mase (vlage) sa površine vlažnog materijala u okolni vazduh, [$kg H_2O/(m^2 s bar)$];
- m_w - masa vlage [kg];
- m_{SM} - masa suve materija [kg];
- r - toplota isparavanja vode na temperaturi površine [J/kg];
- α - koeficijent prelaza toplote između vazduha i površine vlažnog materijala [$W/m^2 K$];
- t_H - temperatura površine vlažnog materijala [$^{\circ}C$];
- p_H - parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu neposredno iznad sloja vlage [bar];
- p_B - parcijalni pritisak pare u vazduhu [bar];
- t_1 - temperatura ulaznog vazduha u sušaru [$^{\circ}C$];
- t_B - temperatura bridova [$^{\circ}C$];
- c_{pm} - specifična toplota vazduha [$kJ/m_n^3 K$];
- \mathcal{Q}_w - toplota potrebna za isparavanje vode [kJ/h];
- \mathcal{Q}_s - toplota potrebna za zagrevanje materijala [kJ/h];
- \mathcal{Q}_p - toplota potrebna za zagrevanje vazduha koji ulazi u sušaru na mestima slabog zaptvanja [kJ/h];
- \mathcal{Q}_z - gubici toplote od zračenja i provođenja [kJ/h];
- V_L - količina vazduha (agensa sušenja) [m_n^3/h];
- \mathcal{Q}_L - gubici toplote sa izlaznim vazduhom [kJ/h];
- \mathcal{Q}_U - ukupna količina toplote [kJ/h];
- W - količina isparele vode [kg/h];
- q - specifična potrošnja energije [$kJ/kg H_2O$];

η_T - termički stepen iskorišćenja;
 ρ_ϵ - Zapreminska gustina [kg/m^3];
 c_{p1} - specifična toplota materijala za sušenje [kJ/kgK];
 c_{p2} - specifična toplota vode [kJ/kgK];
 r_0 - toplota isparavnja vodene pare [kJ/kg];
 c_{pw} - srednja vrednost specifične toplote pregrejane vodene pare [kJ/kgK];
 w_1 - početna vlaga materijala [%];
 w_2 - krajnja vlaga materijala [%];
 t_{w1} - temperatura vlažnog materijala [°C];
 t_{w2} - temperatura suvog materijala [°C];
 t_L - temperatura vazduha okoline [°C];
 τ - vreme sušenja [s];
 h - entalpija [kJ/m_n^3];
 H - visina cevi pneumatske sušare [m];
 v - brzina pri pneumatskom transportu i sušenju [m/s];
 $dw/d\tau$ - brzina sušenja [$\text{kgH}_2\text{O} / (\text{kg SM s})$];
 ξ - koeficijent protoka za Pito cev [-];
 p_{din} - dinamički pritisak [Pa];
 ρ - gustina agensa sušenja [kg/m^3];
 D, d - prečnik cevi sušare [m];
 V - protok vazduha kroz cev sušare [m^3/s];
 v_n - brzina transporta [m_n/s];
 p_a - atmosferski pritisak [bar];
 c_k - stepen koncentracije [kg/kg];
 m_1 - masa (količina) vlažnog materijala [kg/h];
 m_2 - masa (količina) suvog materijala [kg/h];
 V_b - protok (količina) bridova [m^3/h];
 V_G - protok (potrošnja) gasa [m^3/h];
 G_m - kapacitet sušare [kg/h];
 V_k - zapremina pneumatske cevi sušare [m^3];
 k - koeficijent prenosa toplote [$\text{W/m}^2\text{K}$];
 Δt_{sr} - srednja logaritamska razlika temperatura [°C];
 A - površina [m^2];
 Δt - temperaturska razlika [°C];
SM - suva materija.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović, S.: Termodinamika i termotehnika, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
- [2] Tolmač, D. : Mašine i aparati, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1998.
- [3] Tolmač, D. : Prilog teoriji i praksi sušenja, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1997. (Naučna monografija).
- [4] Lambić, M., Tolmač, D. : Tehnička termodinamika, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin. 1997.
- [5] Lambić, M. : Termotehnika sa energetikom, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1998.
- [6] Tolmač, D. : Termotehnički i procesni sistemi - REŠENI ZADACI, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2000.
- [7] Tolmač, D. : Procesne mašine i aparati - REŠENI ZADACI, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2000.
- [8] Adamović, Ž. : Tehnologija održavanja, Tehnički fakultet "M. Pupin", 1996.
- [9] Tolmač, D. : Projekti tehnoloških sistema procesne tehnike, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2000. (Naučna monografija).
- [10] Tolmač, D., Prvulović, S., i dr. : Remont tehničkih sistema, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin.2000.
- [11] Černobiljskij, I., Tananajko, M.: Sushiljnie ustanovki himičeskoj promishlenosti, Tehnika , Kiev, 1969.
- [12] Kuburović, M., Stanojević, M. : Biotehnologija, SMEITS, Beograd, 1997.
- [13] Kneule, F. :Das Trockner, Verlag H.R. Sauerlander C.O. Aaran und Frankfurt am Main, 1965.
- [14] Keey, R.B. : Drying Principles and Practice, Pergamon Press, London, 1972.
- [15] Likov, A.V., Mikhailov, Y.A. : Teorija teplo i masoperenosa, Gosenergoizdat, Moskva, 1963.

- [16] Filonenko, G.K. i drugi : Sushka pishchevuh rastitelnih materialov, Pischevaya promishlenost, Moskva, 1971.
- [17] Bogner, M., Vasiljević, B. : Osnovi teorije i tehnike sušenja, Procesna tehnika, br. 1, 2, 3, 4 str.(77-85) i str.(69-78), SMEITS, Beograd, 1986.
- [18] Likov. A. : Teorija sushki, Energija, Moskva, 1968.
- [19] Popović, G., Đorđević, B., Valent, V., idrugi: Hemijsko inženjerstvo V, Rad, Beograd, 1987.
- [20] Tolmač, D., Prvulović, S. : Kinetika kontaktnog sušenja, energetski bilans i režim sušenja, Procesna tehnika, br. 3-4, str.(61-66), SMEITS, Beograd, 2000.
- [21] Lambić, M. : Inženjerstvo, Tehnički fakultet, "M. Pupin", Zrenjanin, 1997.
- [22] Heß, D. : Comparison of Processing Economics of Different Starch Dryrs , Starch/Starke 36 (1984), str.(369-373).
- [23] Adamović, Ž., Golubović, D. : Totalno održavanje, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2000.
- [24] Tolmač, D. : Analiza energetskih karakteristika valjkastih sušara , sa aspekta razvoja metode kontaktnog sušenja, Magistarski rad, Univerzitet u Novom Sadu, 1994.
- [25] Brkić, M., Janić, T. : Analiza efikasnosti i kvaliteta rada sušara za semenski kukuruz, "PTEP", br. 1-2, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2000.
- [26] Tolmač, D. : Analiza ekonomičnosti rada konvektivnih sušara za skrob, Procesna tehnika, br. 1, str.(20-22), SMEITS, Beograd, 1992.
- [27] Nedeljković, V. : Industrijska ventilacija, Prosveta, Niš, 1981.
- [28] ***VDI - Warmeatlas, Dusseldorf, 1977.
- [29] Eckert,E.R.G. : Heat and Mass Transver, Mc Graw-Hill Book Company, INC, New York, Toronto, London, 1959.
- [30] Mak Adams, V. H. : Prostiranje toplote, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [31] Krischer, V.O., Krol, K.: Trocknungstechnik, Springer- Verlag, Berlin, 1959.
- [32] Perry,R.H., Chilton, C.H.: Chemical Engineer's Handbook, 5-th Ed, Mc Graw Hill, New York, 1973.

- [33] Tolmač, D.: Rezultati ispitivanja kontaktne valjkaste sušare za sušenje skrobnih rastvora, Procesna tehnika br.3 i 4, str.(45-47), SMEITS, Beograd, 1993.
- [34] Kasatkin, A.G.: Osnovnie procesi i aparati himičeskoj tehnologiji, Himija, Moskva, 1973.
- [35] Tolmač, D.: Determination of heat transfer coefficient of contact dryer's rotating cylinder, PhD Thesis, University of Novi Sad, 1995.
- [36] Tolmač, D.: Sušenje na valjcima-valjkaste sušare, Procesna tehnika, br.1, str.(40-42), SMEITS, Beograd, 1991.
- [37] Brkić, M. : Stanje istraživanja i pravci razvoja procesne tehnike i energetike u svetu, "PTEP", (1999) br.1-2, str.(1-7).
- [38] Alan, T. Bull, Geoffrey Holt, Malkolm, D. Lilly. : Biotechnology - Internacional trends and perspectives, OECD, Paris, 1982.
- [39] Filonenko, G.K., Lebedev, P.D.: Sushilnie ustanovki, Gosenergoizdat, Moskva, 1952.
- [40] Prvulović, S : Analiza energetskih karakteristika pneumatskih sušara, sa aspekta razvoja metode konvektivnog sušenja, Magistarski rad, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2001.
- [41] Tolmač, D., Lambić, M. : Heat Transfer Through Rotating Roll of Contact Dryer, International journal, Heat And Mass Transfer, p.p. (569-573), 4/1997.
- [42] Tolmač, D., Lambić, M.,Prvulović, S., Umićević, B. : Određivanje koeficijenta prenosa toplote na sprej sušari, časopis "DIT" - Društvo inženjera i tehničara, br.15-16, str.(17-21), Zrenjanin, 2001.
- [43] Brkić, M., Babić, Lj., Somer, D. : Šaržno sušenje zrnastih proizvoda u ćeliji silosa, Revija-agronomska saznanja, br.1, str.(17-20), Vojvođansko društvo za poljoprivrednu tehniku i energetiku, Novi Sad, 1995.
- [44] Tolmač, D.: Koršćenje toplotnih efekata pri projektovanju pneumatskih sušara, 24. Kongres o KGH, Zbornik radova, str. (100-105), SMEITS, Beograd, 1993.
- [45] Likov, A.V.: Teplomasoobmen, Energija, Moskva, 1976.
- [46] Lambić, M.: Energetika I, Tehnički fakultet "M.Pupin", Zrenjanin, 1995.

- [47] Tolmač, D.: Korišćenja otpadne toplote iz pneumatske sušare pri provetravanju i zagrevanju industrijskih pogona, 22. Kongres o KGH, Zbornik radova, str.(245-249), SMEITS, Beograd, 1991.
- [48] Lambić, M.: Inženjerstvo i inovacije, Tehnički fakultet "M.Pupin", Zrenjanin, 1996.
- [49] Tolmač, D.: Primena pneumatskog transporta u tpolotne svrhe - konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala, Procesna tehnika br.1, str.(33-35), SMEITS, Beograd, 1993.
- [50] Holman, J.P.: Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Companu, New York, 1981.
- [51] Tolmač, D., Lambić, M.: Optimalni radni parametri valjkaste kontaktne sušare, NSS Industrijska energetika '94, Jugoslovensko društvo termičara, Beograd, 1994.
- [52] Tolmač, D. : Projektovanje tehnološko tehničkih sistema, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1999.
- [53] Tolmač, D., Lambić, M.: Kinetika kontaktnog sušenja suspenzije skroba i vode, NSS Procesna tehnika i energetika u poljoprivredi '95, čas. Agronomska saznanja br.3, str.(44-45), Novi Sad, 1995.
- [54] Bogner, M.: Termotehničar, Naučna knjiga, Beograd, 1997.
- [55] Topić, R.: Osnove projektovanja proračuna i konstruisanja sušara, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [56] Tolmač, D., Lambić, M.: Heat transfer from rotating cylindric contact dryer, International Simposium-IS, Energetics and power supply technologies-EPST'95, Proceedings, p(222-227), Novi Sad, 1995.
- [57] Tolmač, D.: Possibilities to use of waste heat in textile industry, IS, EPST'95, Proc. p(364-368).
- [58] Tolmač, D.: An analysis of possibilities to use waste heat in cylindric dryer for carpets, IS, EPST '95, Proc. p(403-406).
- [59] Lambić, M., Tolmač, D. : Tehnička termodinamika, Tehnički fakultet "M. Pupin",Zrenjanin, 1997.
- [60] Tolmač, D.: Analiza energetske karakteristika valjkastih sušara, sa aspekta razvoja metode kontaktnog sušenja, Magistarski rad, Univerzitet u Novom Sadu,1994.

- [61] Tolmač, D., Prvulović, S. : Primena pumpi kompresora i ventilatora u projektima tehnoloških sistema, *stručni seminar "HIDRAULIKA I PNEUMATIKA 2001"*, "OMO" Beograd, 2001.
- [62] Tolmač, D., Prvulović, S. : Neki aspekti rada parnih turbopostrojenja, *stručni seminar "HIDRAULIKA I PNEUMATIKA 2001"*, "OMO" Beograd, 2001.
- [63] Tolmač, D., Prvulović, S., Lambić, M. : Određivanje energetske karakteristike konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala, časopis *Procesna Tehnika*, br.1, str.(70-74), SMEITS Beograd, 2001.
- [64] Voronjec, D. : Tehnološke operacije, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [65] Tolmač, D., Prvulović, S., Tanasijević, A. : MAŠINE I APARATI - Sistemi Hidraulike i Pneumatike, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2001.
- [66] Tolmač, D., Prvulović, S., Živković, D. : Projekti tehnoloških sistema u prehrambenoj industriji - Monografija, "SM" Inženjering, Zrenjanin, 2001.
- [67] Tolmač, D., Prvulović, S., Bulik, D. : Racionalizacija procesa sušenja primenom solarne energije, seminar: KORIŠĆENJE SUNČEVE ENERGIJE 2001. (sistemi, oprema, projektovanje, rad, održavanje), Društvo za opštu i solarnu energiju "YU SOLAR" Beograd, 2001.
- [68] Šešić, B. : Opšta metodologija, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [69] Vukadinović, S. : Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.
- [70] Jaćimović, B., Genić, S., i dr. : Toplotne operacije i aparati, Mašinski fakultet i "SMEITS", Beograd, 1996.
- [71] Tolmač, D., Lambić, M., Prvulović, S., Umićević, B. : Određivanje koeficijenta prenosa toplote na sprej sušari, časopis "DIT" - Društvo Inženjera i Tehničara, br. 15-16, str.(17-21), Zrenjanin, 2001.
- [72] Tolmač, D., Prvulović, S., Petrović, Lj., Bulik, D. : Projekat postrojenja za skladištenje i transport plastičnog granulata, časopis *Procesna Tehnika*, br.1/2002, str.(31-34), SMEITS, Beograd, 2002.
- [73] Herbert, W.C.: *Chemical Engineering Practice*, Butterworths, London, 1963.
- [74] Bosworth, R.: *Heat Transfer Phenomena*, Wiley, New York, and Ass. Gen. Pub. Sydney, 1952.

- [75] Stoever, H.J.: Applied heat transmission, Mc Graw-Hill, New York, 1941.
- [76] Langhaar, H.L.: Dimensional Analysis and the Theory of Models, Wiley, New York, 1951.
- [77] Fishenden, M., Saunders, O.A.: Introduction to Heat Transfer, Oxford Univerziti Press, London, 1950.
- [78] Holman, J.P.: Thermodynamics, Mc Graw-Hill Book Comp., New York, 1980.
- [79] Bošnjaković, F.: Nauka o toplini, II deo, Tehnička knjiga, Zagreb, 1980.
- [80] Fand, R.M.: Heat Transfer by Forced Con-Crossflow, Int. J. Heat Mas Transfer, vol. 8, P. 995, 1965.
- [81] Prvulović, S., Tolmač, D., Bulik, D. : Rezultati istraživanja energetske karakteristika konvektivnog sušenja, časopis Procesna Tehnika, br.1, str.(72-76), SMEITS, Beograd, 2003.
- [82] Tolmač, D., Lambić, M., Adamović, Ž. Ž., Prvulović, S. : Analiza mogućnosti korišćenja otpadne toplote i razvoj rekuperatora za ugradnju na postojećim kotlovskim postrojenjima, časopis Procesna Tehnika, br.1, str.(130-134), SMEITS, Beograd, 2003.
- [83] Levin, D.M.: Termodinamičeskaja teorija i rasčet sushilnih ustanovok, Piščepromizdat, Moskva, 1958.
- [84] Milinčić, D.: Zadaci iz termodinamike, Građevinska knjiga, Beograd, 1981.
- [85] Zdanski, F.: Praktikum za tehnološke operacije, III izdanje, TMF, Beograd, 1976.
- [86] Rietema, K., Verver, C.: Cyclones in Industry, Amsterdam, 1961.
- [87] Reknagel, H., Sprenger, E.: Grejanje i klimatizacija, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
- [88] Soong, C.Y., Lin, S.T., Hwang, G.J.: An Experimental Study of Convective Heat Transfer in Radial Rotating Rectangular Ducts, Journal of Heat Transfer, vol. 113, p. (604-611), Transaction of the ASME, august 1991.
- [89] Isačenko, V.P., Osipova, P.A., Sukomel, A.S.: Teploprerdača, Energija, Moskva, 1975.

- [90] Yong, N.L., Minkowycz, W.J.: Heat Transfer characteristics of the annulus of two coaxial cylinders with one cylinder rotating, *Heat and Mass Transfer*, vol. 32, No4, p. (711-721), 1989.
- [91] Šašić, M.: Proračun transporta fluida i čvrstih materijala cevima, Naučna knjiga, Beograd, 1976.
- [92] Krisher, O.: Naučne osnove tehnike sušenja, Inostrana literatura, Moskva, 1977.
- [93] Bogner, M., Isailović, M.: Zbirka propisa u mašinstvu 1, 2, 3, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [94] Šamić, M.: Kako nastaje naučno delo, Zavod za izdavanje udžbenika, Sarajevo, 1968.
- [95] Dulović, Lj.: Osnovi infarmaciologije i informacione tehnologije, Institut za nuklearne nauke, Boris Kidrič, Vinča, 1991.
- [96] Cvetković, D.: Diskretne matematičke strukture, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [97] Ginzburg, A.S. i drugi: Vlaga v zerne, Kolos, Moskva, 1969.
- [98] Krasnikov, V.V., Danilov, V.A.: Kinetika sušenja različitih materijala i metoda računanja trajanja sušenja, IFZH, XI 4, 1996.
- [99] Lengmire, J.: *Journal of American Chemical Society*, 1918, 46, 1361.
- [100] Faust, A.S.: *Principles of Unit Operations*, John Wiley and Sons. New York, 1960.
- [101] Planovskij, A.N.: *Procesi i aparati hemijske tehnologije*, Himija, Moskva, 1968.
- [102] Braunauer, S. i drugi: Adsorption of gases in Multimolecular Layers, *Journal of American Chemical Society*, 1938, 60, 309.
- [103] Tolmač, D.: Primena i konstrukcija ciklonskih separatora, *Procesna tehnika*, br. 4, SMEITS, Beograd, 1988.
- [104] Stabnikov, V.H.: *Procesi i aparati pishchevih proizvodstva*, Pishchevaja promishlennost, Moskva, 1976.
- [105] Stanišić, S.: Tehnološke operacije II, Toplotne i difuzionne operacije, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1978.

- [106] Lambić, M., Tolmač, D.: Povećanje energetske efikasnosti kontaktne valjkaste sušare, Naučno - stručni skup Industrijska energetika '94, Jugoslovensko društvo tehničara, Beograd, 1994.
- [107] Časopisi - Heat and Mass Transfer.
- [108] Sekulić, D.P.: Eksperimentalni kurs iz prenosa toplote, FTN, Novi Sad, 1984.
- [109] Hilpert, R., Forsch Gebiete Ingenieurw., 4, (215-224), 1933.
- [110] Eberle, C.Z. Ver. deut. Ing., 52, 481-487, 539-547, 569-574, (1908); Mitt. Forschungsarb., 78 1 (1909).
- [111] Aihara, T., Fu, W.S., Suzuki, Y.: Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer from Horizontal Cylinders in Downward Flow of Air-water mist, Journal of Heat Transfer, ASME, vol. 112, p.p. (472-478), MAY 1990.
- [112] Knudsen, M., Katz, D.L.: Fluid dynamics and Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1965.
- [113] Krasnosčekov, E.A., Sukomel, A.S.: Zadačnik po teploperedače, Energija, Moskva, 1980.
- [114] Zrnić, S.: Grajanje i klimatizacija, Naučna knjiga, Beograd, 1975.
- [115] Ernest, J., Herman, B.: Chemical Engineering Calculations, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York, 1959.
- [116] Batuner, L.M., Pozin, M.E.: Matematičeski meodi v hemičeskoj tehniki, Goshimizdat, 1963.
- [117] Voronjec, K.: Mehanika fluida, Naučna knjiga, Beograd, 1962.
- [118] Miheev, A., Miheeva, M.: Osnovi teploperedači, Energija, Moskva, 1973.
- [119] Kern, D.Q.: Process Heat Transfer, Mc Graw-Hill, New York, 1950.
- [120] Leva, M.: General Discussion on Heat Transfer, sec. V, Institution of Mechanical Engineers, London, 1951.
- [121] Vredenberg, H.A.: General discussion on Heat Transfer, Institution of Mechanical Engineers, London, 1951.

- [122] Nakai, S. Okazai, T., Heat Transfer from Horizontal Circular Wire at small Reynold and Grashof Numbers-1. Pure Convection, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 18, P. 387, 1975.
- [123] Lebedev, P.P.: Rasčeta i projektovanje sushilnih ustanovok, M-L, GEI, 1963.
- [124] Prvulović, S., Tolmač, D., Lambić, M., : Određivanje energetske karakteristike konvektivne sušare sa pneumatskim transportom materijala, časopis Procesna Tehnika, br.1, str.(70-74), SMEITS, Beograd, 2001.
- [125] Prvulović, S., : Analiza mogućnosti povećanja kapaciteta sušare u periodu remonta industrijskih postrojenja, XXVI Majski skup održavalaca, Zbornik radova, str.(277-280), DP "OMO", Beograd, 2003.
- [126] Prvulović, S. : Rezultati istraživanja kinetike konvektivnog sušenja, časopis Procesna Tehnika, S10 (u pripremi za štampu), SMEITS, Beograd, 2004.
- [127] Tolmač, D., Prvulović, S., : Rekuperacija otpadne toplote na industrijskom postrojenju pneumatske sušare, XXVI Majski skup održavalaca, Zbornik radova, str.(273-276), DP "OMO", Beograd, 2003.
- [128] Tolmač, D. : Mašine i aparati - Klipna, turbo i termopostrojenja, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2001.
- [129] Tolmač, D. : Pneumatski transport, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 1991.
- [130] Tolmač, D. : Projekti tehnoloških sistema u prehrambenoj industriji, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2001. (Naučna monografija).
- [131] Tolmač, D., Lambić, M., Prvulović, S. : Analiza postojećih rešenja razmenjivača toplote i fenomena kondenzacije, časopis "DIT" - Društvo Inženjera i Tehničara, str(21-28), br.19-20, Zrenjanin, 2003.
- [132] Tolmač, D., Lambić, M., Adamović, Ž., Prvulović, S. : Analiza mogućnosti korišćenja otpadne toplote i razvoj rekuperatora za ugradnju na postojećim kotlovskim postrojenjima, časopis Procesna Tehnika, br.1, str.(130-134), SMEITS, Beograd, 2003.
- [133] Tolmač, D., Lambić, M., Prvulović, S. : Dinamika prenosa toplote sa aspekta optimalnog dimenzionisanja razmenjivača toplote - rekuperatora, časopis "DIT" Društvo Inženjera i Tehničara, str.(15-20), br.19-20, Zrenjanin, 2003.

- [134] Tolmač, D., Prvulović, S., Petrović, Lj., Bulik, D. : Razvoj tehnoloških rešenja za rekuperaciju otpadne toplote u kotlovskim postrojenjima, XXVI Majski skup održavalaca, Zbornik radova, str.(281-286), "OMO", Beograd, 2003.
- [135] Tolmač, D. : Korišćenje otpadne toplote na sušari za grejanje industrijskog pogona, časopis Procesna Tehnika i Energetika u Poljoprivredi, br.5, str.(111-113), Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2003.
- [136] Lambić, M. : Energetika, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenajnin, 2003.
- [137] Brkić, M. : Termotehnika u poljoprivredi, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 1999.