

# Eksperimentalna analiza procesa sušenja primjenom toplinske energije u tekstilnoj industriji

---

**Dorotić, Ivana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

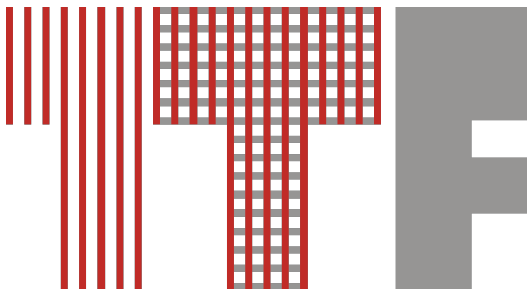
**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Textile Technology / Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:201:079225>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Textile Technology University of Zagreb - Digital Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA PROCESA SUŠENJA PRIMJENOM TOPLINSKE**

**ENERGIJE U TEKSTILNOJ INDUSTRIJI**

Diplomski rad

**IVANA DOROTIĆ**

ZAGREB, RUJAN 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD  
**EKSPERIMENTALNA ANALIZA PROCESA SUŠENJA PRIMJENOM TOPLINSKE  
ENERGIJE U TEKSTILNOJ INDUSTRIJI**

Mentor:

**Doc. dr. sc. Ivana Špelić**

Student:

**Ivana Dorotić, 10462/TKME**

ZAGREB, RUJAN 2020.

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF TEXTILE TECHNOLOGY

**SENIOR GRADUATE THESIS**  
**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DRYING PROCESS APPLYING HEAT ENERGY**  
**IN THE TEXTILE INDUSTRY**

Mentor:

**Assistant Professor Ivana Špelić, PhD**

Student:

**Ivana Dorotić, 10462/TKME**

ZAGREB, SEPTEMBER 2020

Temeljna dokumentacijska kartica

<b>Institucija u kojoj je rad izrađen:</b>	Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet
<b>Mentor rada:</b>	Doc. dr. sc. Ivana Špelić
<b>Broj stranica:</b>	101
<b>Broj slika:</b>	32
<b>Broj tablica:</b>	7
<b>Broj literaturnih navoda:</b>	67
<b>Datum predaje diplomskog rada:</b>	16. rujna 2020.
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	28. rujna 2020.
<b>Jezik teksta:</b>	Hrvatski
<b>Jezika sažetka:</b>	Hrvatski i engleski
<b>Članovi povjerenstva:</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. prof. dr. sc. <b>Tomislav Rolich</b>, Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološkog fakultet</li><li>2. doc. dr. sc. <b>Ivana Špelić</b>, Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološkog fakultet</li><li>3. doc. dr. sc. <b>Bosiljka Šaravanja</b>, Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološkog fakultet</li></ol>

*U prvom redu veliko hvala mojoj mentorici Doc.dr.sc. Ivani Špelić na stručnoj pomoći, vodstvu, izuzetnoj podršci, strpljenju i vremenu uloženom prilikom izrade diplomskog rada.*

*Također puno hvala Prof. dr. sc. Alki Mihelić – Bogdanić na pruženoj pomoći i svim savjetima pri izradi ovog rada.*

*Od srca najveća hvala mojim roditeljima, teti i sestri na ljubavi, podršci i razumijevanju tokom svih godina studiranja. Hvala što ste vjerovali u mene.*

*Mojim prijateljicama Mariti i Ani, volim vas. „Ni jedno prijateljstvo nije slučajno.“*

*I na kraju, hvala Josipu što si uvijek uz mene.*

***“Mojoj mami i tati. Nikada ne bih uspjela bez vaše potpore i ljubavi.”***

## SAŽETAK

Proces sušenja istovremeno predstavlja prijenos topline i tvari te potencijalnu izmjenu fizikalno - strukturnih svojstva materijala, koji je podvrgnut tom procesu. U tekstilnoj industriji procesi sušenja najčešće obuhvaćaju postupak uklanjanja vlage iz proizvoda, bilo da se radi o vlaknima, pređama, tkaninama ili gotovim odjevnim predmetima. Tehnološki proces sušenja primjenom toplinske energije provodi se putem medija za sušenje, koji može biti nezasićeni zrak, dimni plinovi ili pare. Sušenje je tehnološki složen, energetske zahtjevan i dugotrajan proces uklanjanja vlage iz materijala, pa ga je stoga neophodno je provesti u što kraćem vremenskom razdoblju uz minimalan utrošak energije, uz istovremeno očuvanje kvalitete tkanine. Najčešće metode poboljšanja obuhvaćaju procese sušenja s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici, s višestupanjskim zagrijavanjem zraka, s optokom ili recirkulacijom, s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom te kombinacijom optoka i regeneracije topline. Postojeće konvencionalne sušare najčešće koriste električne grijače te stoga troše puno energije, pa se energetske uštede u kontinuiranim tekstilnim sušarama mogu postići prvenstveno prethodnim smanjenjem sadržaja vlage u tkanini mehaničkim postupcima, prije no što vlažna tkanina uđe u kontinuiranu sušaru. Ispitana je mogućnost energetske uštede na primjeru završne faze dorade u procesu mokre obrade tkanina, odnosno bojadisanja tekstilnih tkanina s posebnim osvrtom na proces sušenja u kontinuiranoj sušari. U radu su prikazani rezultati analize parametara godišnje uštede goriva u kontinuiranoj sušari s direktnim i indirektnim zagrijavanjem zraka. Energetske uštede goriva u postupcima sušenja u sušarama uz ugrađen sustav direktnog ili indirektnog zagrijavanja fluida, mogu se postići optimizacijom postojećih procesa. Analiza optimizacije indirektnog i direktnog sustava zagrijavanja fluida utvrdila je da je postupak sušenja s direktnim zagrijavanjem omogućuje znatnije uštede goriva te je stoga ekološki prihvatljivije.

***Ključne riječi:*** procesi sušenja, toplinska energija, energetske uštede, sušare, tekstilna industrija, ušteda goriva, optimizacija procesa sušenja



## **ABSTRACT**

The drying process represents simultaneous heat and mass transfer and potential alteration in physical and structural properties of the material subjected to this process. In the textile industry, drying processes usually represents any process of moisture removing from the product, whether the products are fibres, yarn, fabric or finished clothing garments. The technological process of drying using thermal energy is carried out by a drying medium, in form of the unsaturated air, flue gases or steam. Drying is a technologically complex, energy-intensive and time-consuming process of removing moisture from the material, and thus it should be carried out as quickly as possible with minimal energy consumption, while preserving the fabric quality. The most common improving methods include drying processes with additional air heating in the dryer, multi-stage air heating, drying with circulation or recirculation, drying with regeneration, and combined drying with circulation and heat regeneration. Existing conventional dryers (stenters) are commonly equipped by electric heaters and thus tend to be highly energy consuming. With this in mind, the energy savings in continuous textile stenters can be achieved if the fabric moisture content is previously reduced by mechanical procedures, before the damp fabric enters the stenter. The possibility of energy savings was done on the example of the fabric finishing final stages in wet processing with special reference to the drying process in a continuous stenters. The paper presents the analysis of the parameters such as annual fuel savings in a continuous stenters in reference to direct and indirect air heating system. The fuel savings in dryers with direct and indirect air heating can be achieved by optimizing existing processes. Comparison of the optimization in indirect and direct air heating systems of stenters, revealed that the drying process with direct heating system is capable of achieving significant fuel savings and is therefore more environmentally friendly.

*Keywords: drying processes, thermal energy, energy savings, dryers, textile industry, fuel saving, drying process optimization*

## SADRŽAJ

	str.
SAŽETAK .....	IV
ABSTRACT.....	V
1. Uvod .....	12
2. Teorijski pregled.....	12
2.1. Uvod u procese sušenja .....	14
2.1.1. Osnovni pojmovi i definicije .....	15
2.1.2. Tehnološki proces sušenja primjenom toplinske energije.....	17
2.1.2.1. Postupci uklanjanja vlage .....	18
2.1.2.2. Vrste sušenja .....	22
2.1.2.3. Mjerenje vlažnosti zraka .....	24
2.1.2.4. Faze industrijskog sušenja tekstilnih materijala.....	26
2.1.2.5. Vrste sušenja .....	30
2.2. Primjeri primjene sušenja u tekstilnoj industriji .....	36
2.3. Proračun procesa sušenja .....	38
2.3.1. Bilanaca materijala.....	41
2.3.2. Bilanca topline.....	42
2.3.3. Proces sušenja.....	44
2.4. Uređaji za sušenje primjenom topline u tekstilnoj industriji .....	46
2.4.1. Sušare s transportnom trakom .....	46
2.4.2. Kontinuirane sušare .....	47
3. Eksperimentalni dio - Potencijalna poboljšanja procesa sušenja .....	49
3.1 Sušenje s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici .....	50

3.2. Sušenje s višestupanjskim zagrijavanjem zraka .....	52
3.3. Sušenje s optokom ili recirkulacijom.....	54
3.4. Sušenje s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom .....	57
3.5. Sušenje s kombinacijom optoka i regeneracije topline .....	60
3.6. Sušare sa aspekta obnovljivih izvora energije i održivog razvoja .....	63
3.7. Sustavi zagrijavanja zraka u kontinuiranim sušarama .....	69
4. Rezultati .....	70
4.1. Proračun energetske uštede u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka	70
4.1.1. Energetski proračun u jednostavnom procesu sušenja .....	76
4.1.2. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s optokom ili recirkulacijom (recirkulativni, tj. optočni proces uz optok $Y_O = 53\%$ ) .....	77
4.1.3. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom uz $\eta_R = 58\%$ .....	78
4.1.4. Proračun energetske uštede u kombiniranom procesu sušenja s kombinacijom optoka i regeneracije topline .....	80
4.2. Proračun energetske uštede u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka ...	81
4.1.1. Energetski proračun u jednostavnom procesu sušenja .....	83
4.1.2. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s optokom ili recirkulacijom (recirkulativni, tj. optočni proces uz optok $Y_O = 53\%$ ) .....	84
4.1.3. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom uz $\eta_R = 58\%$ .....	86
4.1.4. Proračun energetske uštede u kombiniranom procesu sušenja s kombinacijom optoka i regeneracije topline .....	87
5. Rasprava.....	90

6. Zaključak.....	93
7. Literatura.....	95

## POPIS TABLICA

Tab. 1. Značajke procesa sušenja	21
Tab. 2. Princip uklanjanja vlage ovisno o fazi industrijskog procesa	37
Tab. 3. Potrošnja energije u kontinuiranoj sušari	49
Tab. 4. Ekonomski, socijalni i ekološki utjecaji u polju tekstilne industrije	63
Tab. 5. Usporedba godišnjih ušteda u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka	81
Tab. 6. Usporedba godišnjih ušteda u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka	89
Tab. 7. Usporedba godišnjih ušteda goriva u kontinuiranoj sušari s indirektnim i direktnim zagrijavanjem zraka za svaki pojedini proces	92

## POPIS SLIKA

Sl. 1. Složenost procesa sušenja	15
Sl. 2. Slobodna i vezana vlaga u tekstilnom materijalu	18
Sl. 3. Ovisnost ravnotežne vlažnosti materijala o relativnoj vlažnosti zraka	19
Sl. 4. Psihrometar	25
Sl. 5. Ramzinov h,d dijagram za vlažni zrak	25
Sl. 6. Karakteristični periodi sušenja materijala	27
Sl. 7. Faze industrijskog sušenja	27
Sl. 8. Faze predsušenja	28
Sl. 9. Faze sušenja	29
Sl. 10. Faze dosušivanja	30
Sl. 11. Shema mehanizma sušenja parnim cilindrima	32
Sl. 12. Uređaj za poboljšanu naknadnu obradu tekstilnog materijala primjenom mikrovalova	33
Sl. 13. Prikaz prijenosa topline mikrovalnim zračenjem i konvencionalnim zagrijavanjem	34
Sl. 14. Teoretski proces sušenja u h,d dijagramu	39
Sl. 15. Shenatski prikaz jednostavne sušare	44
Sl. 16. Jednostavan proces sušenja prikazan u h,d dijagramu	45
Sl. 17. Shematski prikaz sušare s dogrijavanjem zraka	50
Sl. 18. Proces sušenja s dogrijavanjem zraka u h,d dijagramu	51
Sl. 19. Shematski prikaz sušenja s višestupanjskim zagrijavanjem zraka	52
Sl. 20. Proces sušenja s višestupanjskim zagrijavanjem zraka prikazan u h,d dijagramu	53
Sl. 21. Shematski prikaz sušenja s djelomičnim optokom zraka	55

Sl. 22. Proces sušenja s djelomičnim optokom zraka prikazan u h,d dijagramu	56
Sl. 23. Shematski prikaz sušenja s regeneracijom topline	58
Sl. 24. Proces sušenja s regeneracijom topline prikazan u h,d dijagramu	59
Sl. 25. Shematski prikaz kombiniranog sušenja s optokom i regeneracijom topline	61
Sl. 26. Proces kombiniranog sušenja s optokom i regeneracijom topline prikazan u h,d dijagramu	62
Sl. 27. Klasifikacija solarnih sušara	66
Sl. 28. Shematski prikaz postrojenja za visoko-temperaturno sušenje drvnog ostatka odnosno piljevine u svrhu dobivanja briketa	68
Sl. 29. Shematski prikaz procesa bojadisanja tkanina	70
Sl. 30. Primjer kontinuirane sušare tkanina	73
Sl. 31. Shematski prikaz kontinuirane sušare sa šest modularnih komora i indirektnim zagrijavanjem zraka sustavom vrelouljnog kotla i toplovoda	74
Sl. 32. Shematski prikaz kontinuirane sušare sa šest modularnih komora i direktnim zagrijavanjem zraka plinskim plamenikom za direktno izgaranje	83

## **1. Uvod**

Cilj ovog rada je eksperimentalna analiza procesa sušenja primjenom toplinske energije u tekstilnoj industriji. Sušenje je tehnološki proces uklanjanja vlage iz materijala, uz rijetko uklanjanje primjesa drugih kapljevina, npr. različiti ugljikovodici, esteri, alkoholi, itd. Procesom sušenja obuhvaća uklanjanje vlage iz strukture čvrstih tvari, drugim riječima dobivanje suhog proizvoda s malim udjelom vlage. Tijekom proces sušenja se odvijaju istovremeni procesi prijenosa količine gibanja, toplinske energije i tvari. Sušenje podrazumijeva dovođenje određene količine topline za isparavanje i odvođenje vlage iz strukture materijala.

Uklanjanje vlage iz materijala je energetske intenzivan i skup proces, te je prije samog postupka sušenja potrebno raznim mehaničkim postupcima ukloniti što je više vlage iz materijala. Proces sušenja se koristi u mnogim industrijskim granama poput kemijske, prehrambene, papirne, tekstilne i farmaceutske. Zadatak tehnologije sušenja u tekstilnoj industriji je uklanjanje vlage iz proizvoda (bilo da se radi o vlaknima, pređi, tkanini ili gotovom odjevnom predmetu), gdje se najvećim dijelom utječe na kvalitetu proizvoda i ukupan učinak proizvodnje. Pri mokroj obradi tekstila (bojadisanje) oko 25% energije proizvodnog procesa se koristi za sušenje proizvoda, radi smanjenja mase različitim materijalima, stoga je važno osigurati što manji utrošak energije uz istovremeno smanjenje zagađenja okoliša. U radu se opisuju značajke procesa sušenja, primjeri primjene u tekstilnoj industriji, proračun procesa sušenja i potencijalna poboljšanja procesa sušenja s naglaskom na energetske uštede.

## **2. Teorijski pregled**

Procjenjuje se da od ukupno potrošene energije koju koristi industrijski sektor, čak 12% potrošnje otpada na procese sušenja. Proces sušenja može da ima negativan utjecaj na životnu sredinu u vidu zagađenja atmosfere zbog oslobađanja štetnih agensa sušenja i emisija  $CO_2$  i velike potrošnje energije. Smanjenje



ovog udjela doprinosi i smanjenju emisije  $CO_2$ , što je moguće unapređenjem starih postojećih tehnologija sušenja i osvajanjem i uvođenjem novih. Uporaba filtera zraka, izgradnja postrojenja za visokotemperaturno sušenje uporabom solarne energije i postrojenja za sušenje s obnovljivim izvorima energije, mogu u velikoj mjeri doprinijeti zaštiti okoline, energetske sigurnosti, smanjenju neophodne energije i održivim razvoju.

Primjerice, 70-ih i 80-ih godina prošlog stoljeća, tekstilna industrija je bila među deset najvećih potrošača energije u Sjedinjenim Američkim Državama. Čak polovina od ukupne energetske potrošnje proizvodnog procesa troši se u procesu sušenja pri proizvodnji gotovih tekstilnih proizvoda (Brookstein, 1979.).

Novija istraživanja nakon 80 – ih godina prošlog stoljeća, utvrdila su da se čak do 80% ukupne energije koristi pri procesima sušenja u tekstilnoj industriji (Galoppi et.al., 2017.). Potrošnja energije u tekstilnim tvornicama je također u porastu zbog modernizacije strojeva i korištenja procesne opreme s neučinkovitim radnim parametrima. Autori navode da je taj trošak oko 15% do 20% veći od samog troška proizvodnje i nabave sirovine (Dhayanewaran i Ashokkumar, 2013.). Zbog industrijskog rasta i širenja, potrošnja energije u zemljama u razvoju iznimno raste. Budin i Mihelić – Bogdanić (2014.) ističu da se energija u industriji može očuvati gospodarstvenom fazom koja može rezultirati očuvanjem energije s 3% do 7 % po jedinici proizvoda, zatim rekonstrukcijom sadašnje tehnologije i sustava s očuvanjem energije 5% do 10%, ali to uključuje velike troškove investicije. I kao potonji navode potpunu rekonstrukciju postojećeg sustava odnosno procesa, ali on istovremeno uključuje visoke inicijalne troškove ulaganja i najveće poboljšanje glede potrošnje energije (ovisno o industrijskom procesu povećanje energetske učinkovitosti kreće se u rasponu od 25% - 60%).

Energetske uštede proizvodnih proces se mogu postići kod (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

- procesa ventilacije i klimatizacije gdje se ušteda postiže eliminiranjem gubitaka snage i gubitaka topline zraka u zimskom razdoblju,

- industrijskog kotla ili peći gdje na povišenje stupnja iskorištenja 4–5% utječu proces izgaranja, regulacija, smanjenje gubitaka zračenja te potrošnja električne energije za pogon pomoćnih uređaja,
- procesa kompresije i ventilacije, kod ovih procesa otpadna toplina se upotrebljava u uređajima za zagrijavanje sanitarne vode i prostora s povratom od 40% do 85%,
- istovremene kogeneracijske proizvodnje električne i toplinske energije sa znatnim energetske uštedama u vidu kombinacije stacionarnog dizelskog motora i kotla na otpadnu toplinu, odnosno energiju sadržanu u rashladnoj vodi i dimnim plinovima.
- primjene komprimiranih plinova – specifična potrošnja energije ovisi o pravilnom odabiru parametara i vođenja procesa, regulacije, održavanja pogona, povrat otpadne topline,
- suvremenih procesa vraćanja vode kao energenta u ponovni proces, gdje je dolazi do uštede vode i kemikalija za pročišćavanje što se očituje u smanjenju opterećenja za okoliš kao i povećanje ekonomičnosti.

Nadalje, s ciljem minimaliziranja potrošnje energije u tekstilnoj industriji, ključno je da se procesi sušenja koji se najčešće izvode u sušarama, provedu u što kraćem vremenskom intervalu s optimalnim uvjetima rada te analizom učinkovitosti sustava (Akyol et al., 2014.). Stoga je termodinamička analiza značajna za oblikovanje, analizu i optimizaciju toplinskih sustava (Cay et al., 2010.).

## **2.1. Uvod u procese sušenja**

Sušenje je energetske intenzivan proces uklanjanja vlage iz materijala, koji se u praksi najčešće provodi kao pripremna operacija kada se materijal suši prije prerade ili kao završni stupanj prerade u različitim industrijskim granama (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.). Tijekom procesa sušenja odvijaju se procesi prijenosa tvari, topline i količine gibanja, te se koristi velika količina energije za uklanjanje odnosno isparavanje tekućine iz materijala koji se suši (Katić i Plietić, 1997.).

### 2.1.1. Osnovni pojmovi i definicije

Postupci uklanjanja vlage iz materijala mogu biti:

- Mehanički,
- Fizikalno – kemijski,
- Toplinski.

U tekstilnoj industriji procesi sušenja najčešće označavaju bilo koji postupak uklanjanja vlage iz proizvoda (bilo da se radi o vlaknima, pređi, tkanini ili gotovom odjevnom predmetu). Pri mokroj obradi tekstila (npr. bojadisanje) oko 25% energije proizvodnog procesa se koristi za sušenje proizvoda, stoga su potencijalne energetske uštede od iznimne važnosti.

Faze sušenja:

- 1) FAZA 1\_prije sušenja potrebno je mehanički ukloniti što je više moguće vlage,
- 2) FAZA 2\_ slijedi toplinski separacijski proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala u svrhu dobivanja suhog proizvoda (sastoji se od 2 faze).

Proces sušenja je vrlo složen i istovremeno se odvijaju procesi prijenosa tvari, topline i količine gibanja.



Slika 1. Složenost procesa sušenja

Postupci sušenja ili uklanjanja vlage iz tekstilnih materijala se mogu klasificirati kao predsušenje i završno sušenje ili kao mehaničko i toplinsko sušenje. Predsušenje se odvija mehaničkim ili toplinskim postupcima, dok završno sušenje obuhvaća samo toplinske postupke uklanjanja vlage iz tekstilnih materijala.

Predsušenjem se postiže sniženje ravnotežne vlage (reprize) do neke unaprijed određene razine, nakon čega slijedi završno sušenje u kojem se ravnotežna vlaga smanjuje na konačnu željenu razinu. U fazi predsušenja uobičajeno se vlaga uklanja postupcima mehaničkog odvlaživanja, jer takvi postupci zahtijevaju manje energetske potrošnje po jedinici mase uklonjene vlage. Usprkos tome, udio vlage koja ostaje prisutna u tekstilnim materijalima je i dalje previsoka u odnosu na vrijednost ravnotežne vlage, koja se želi postići (Carr et al., 2015.).

Faza predsušenja najčešće obuhvaća mehaničko uklanjanje vlage postupcima (Carr et al., 2015.):

- cijedenje ili valjanje (zahtjeva jako malu energetska potrošnju od oko  $58 \text{ kJ/kg}$  uklonjene vlage)
- vakuumska ekstrakcija vlage (zahtjeva energetska potrošnju od oko  $700 \text{ kJ/kg}$  uklonjene vlage)
- centrifugalno uklanjanje vlage

Iznimka je jedino postupak predsušenja tekstilnih materijala i tepiha u infracrvenim sušarama radijacijom.

Faza sušenja najčešće obuhvaća uklanjanje vlage posredstvom topline (Carr et al., 2015.):

- kondukcijske sušare:
  - sušenje rotirajućim vrućim cilindrima (energetska potrošnja oko  $4700 \text{ kJ/kg}$  uklonjene vlage),
- konvekcijske sušare:
  - sušare cirkulacijom zraka,
  - sušare s propuhivanjem zraka kroz tekstilni materijal (za sušenje netkanog tekstila koriste se konvekcijske sušare s perforiranim valjkom - zrak se upuhuje na tekstilni materijal koji prolazi preko valjka, a usisni mehanizam izdvaja vodu uklonjenu iz materijala; za sušenje tkanina se upotrebljavaju konvekcijski sušionici s okvirom na koji se napinje tkanina kako bi se kontrolirale poprečne dimenzije tkanine prilikom transporta kroz sušionik),

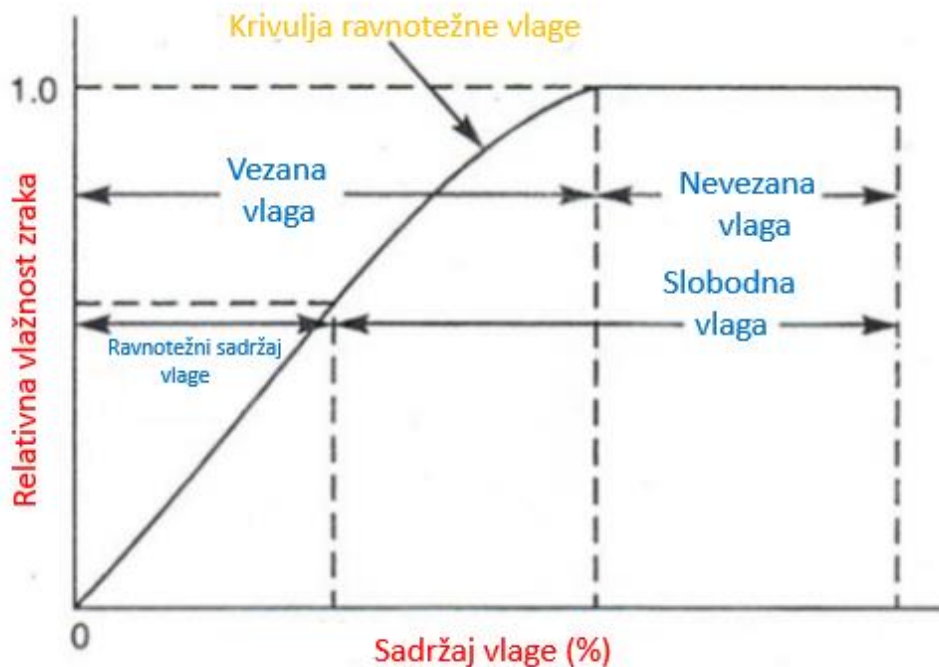
- kontinuirane sušare sa zračnim strujama (za sušenje tekstilnih materijala niske zrakopropusnosti jer se zračne struje pri velikim brzinama upuhuju okomito na lice i naličje tekstilnog materijala niske zrakopropusnosti kroz mlaznice),
- sušare s infracrvenim zračenjem,
- radiofrekvencijske i mikrovalne sušare (koriste princip dielektričnog zagrijavanja tekstilnih materijala, no troškovi korištenja takvih sušara su puno veći od konvekcijskih sušara iako takve sušare pružaju mogućnost ravnomjernijeg sušenja bez mogućnosti presušivanja tekstilnih materijala).

### 2.1.2. Tehnološki proces sušenja primjenom toplinske energije

Tehnološki proces sušenja primjenom toplinske energije provodi se putem medija za sušenje, koji može biti **nezasićeni zrak, dimni plinovi ili pare**. Baza procesa je prijelaz vlage sadržane u materijalu iz tekuće u plinovitu fazu i odvođenje pare radi dobivanja suhog materijala dobre kvalitete. Prevođenje kapljevine u paru odvija se ili kod temperature niže od vrelišta kapljevine i to je **proces ishlapljivanja** ili kod temperature vrelišta, a to je **proces isparavanja**. Čvrste tvari suše se isparavanjem vode, pri čemu je vlažnom materijalu potrebno dovesti toplinu. Tijekom procesa dolazi do ishlapljivanja kapljevine s površine materijala čime se suši površinski sloj i smanjuje se površinska vlažnost tvari. Zbog nastale razlike koncentracije vlaga difundira iz unutrašnjosti prema površini materijala. Na difuziju vlage prema površini utječu struktura materijala, kapilarne pojave i brzina difuzije pare. Budući da je voda u krutoj tvari vezana kapilarnim silama, tlak je vodene pare iznad krute tvari **manji** nego tlak vodene pare nad površinom vode kod iste temperature (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

### 2.1.2.1. Postupci uklanjanja vlage

Vlaga u materijalu može biti slobodna ili vezana. Slobodna vlaga je ona koja ima zanemariv tlak vodene pare u usporedbi s tlakom pare nad površinom vode kod iste temperature. Vezana vlaga ima niski tlak vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temperature (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.). Slobodna vlaga će se kretati kapilarnim tokom, dok će se vezana kretati difuznim mehanizmom.



Slika 2: Slobodna i vezana vlaga u tekstilnom materijalu (IZVOR: Gangadhar, 2016.)

Podjela materijala (Tripalo i Viličić, 1992.):

- higroskopni i
- nehigroskopni.

Higroskopnost materijala je mjera sposobnosti upijanja ili vezanja vode u tekućoj ili plinovitoj fazi iz okoline. Razlika između higroskopnih i nehigroskopnih materijala jest u količini vezane vlage. Nehigroskopni materijali zbog svoje unutrašnje, makroporozne strukture vežu relativno malu količinu vlage na sebe i imaju nisku relativnu vlažnost. Higroskopni materijali imaju visoku relativnu vlažnost, te je

u njihovoj strukturi odnosno uskim porama vlaga čvrsto vezana. Dakle, nehigroskopni materijali će se bolje osušiti od nehigroskopnih (Tripalo i Viličić, 1992.; Wernecke i Wernecke, 2014.)

Tekstilni materijali su više ili manje higroskopni, te stalna izmjena molekula vode između prostora i uzorka odvija se različitom brzinom. Ravnoteža se prikazuje sorpcijskom izotermom, ona predstavlja karakterističnu krivulju koja pri konstantnoj temperaturi, prikazuje ovisnost ravnotežne vlažnosti materijala o relativnoj vlažnosti zraka (sl. 3). Na njihov oblik utječu različiti čimbenici poput veličine, gustoće i morfologije materijala, te se one uvijek određuju eksperimentalno (Wernecke i Wernecke, 2014.).



Slika 3. Ovisnost ravnotežne vlažnosti materijala o relativnoj vlažnosti zraka (IZVOR: Wernecke i Wernecke, 2014.)

Brzina sušenja ovisi:

- prijenosu topline iz okoline na površinu vlažnog materijala te
- prijenosu vlage iz unutrašnjosti prema površini materijala i njeno isparavanje s površine.

Ta dva procesa se odvijaju istovremeno, te će brzina sušenja materijala ovisiti o brzini pojedinog procesa. Uklanjanje vodene pare s površine materijala ovisi o vanjskim uvjetima (temperaturi, vlažnosti, brzini strujanja zraka, tlaku, itd.).

Voda je u tekstilnom materijalu vezana kemijski ili mehanički. Većina kemijskih veza nastaje vezanjem vodika između celuloznih vlakana i molekule vode. Kako bi se omogućilo latentno toplinsko isparavanje

vlage iz tekstilne tkanine, takva veza mora biti prekinuta. Postupci mehaničkog uklanjanja vlage iz materijala najčešće nisu prikladni za oslobađanje molekula vode iz vlaknastog supstrata, već se takvim mehaničkim uklanjanjem oslobađa samo slobodna vlaga, koja nije kemijski vezana. Osim vodikovih veza, veliku prepreku u oslobađanje vlage predstavlja površinska napetost između vode i vlakna te omjer slobodne površine vlakna i sadržaja vode vezene u vlaknu (Brookstein, 1979.).

Niska površinska napetost rezultira povećanjem izdvajanja vlage dok će visoki omjer slobodne površine vlakna i sadržaja vode vezene u vlaknu, rezultirati smanjenjem izdvajanja vlage iz tekstilnih materijala.

#### **Mehanizmi prenošenja vlage unutar materijala:**

- Kapilarnim efektom
- Difuzijom vodene pare kroz šire kapilare i
- kapilarnom kondenzacijom.

Kod većine materijala, njihova unutrašnja struktura uvjetuje prijenos vlage i kapilarnim i difuzijskim mehanizmom. Veličina pora jedan je od čimbenika koji određuje kojim mehanizmom će se vlaga kretati. Ukoliko je promjer pora manji od  $10^{-7}$  m (Perry i Chilton, 1973.) vlaga se kreće difuzijom vodene pare kroz kapilare (tvari organskog podrijetla, amorfne, vlaknate ili gelaste strukture), dok kod slučaja većeg promjera od navedenog vlaga će se kretati kapilarnim mehanizmom (anorganske tvari odnosno materijale zrnate ili kristalne strukture).

Pri kapilarnoj kondenzaciji vlaga kapilarno difundira u područje u kojemu je prethodno ishlapila i ponovo kondenzira u nekom užem dijelu kapilare ili na mjestu niže temperature. Djelovanjem difuzijskog mehanizma, koji je u sinergiji s kapilarnim silama uvelike olakšava proces sušenja, te se uklanjanje vlage arbitrira površinskom napetošću, a ne difuzijom. Kod ove vrste mehanizma značajno je stvaranje konkavnog ili konveksnog meniskusa te stvaranje međufazne napetosti na granici kruto - tekuće. Kod razvoja kapilarnih sila, konkavni meniskus povlači tečnost naviše odnosno konveksni naniže. Zaključno, kako bi se vlaga mogla kretati unutar porozne strukture materijala prema površini potrebne su kapilarne



snage kao pokretač, te se one mogu poboljšati smanjenjem površinske napetosti upotrebom površinski aktivnih tvari (Anandharamakrishnan, 2017.).

Kretanje vlage kroz unutrašnjost materijala difuzijom nastaje zbog razlike parcijalnog tlaka ili koncentracije između površine materijala i okolne faze nezasićenih plinova, odnosno difuzija vodene pare je spontani proces prelaženja molekula vodene pare sa mjesta veće na mjesto manje koncentracije sa ciljem njihova izjednačavanja. Osim gradijenta tlaka ili koncentracije, prijenos mase ovisi o temperaturnom gradijentu, koji je posljedica dovođenja topline vlažnom materijalu (Dincer i Zamfirescu, 2016.).

**Tab. 1:** Značajke procesa sušenja

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veličina proizvoda</li> <li>• Struktura i parametri materijala</li> <li>• Vrsta i parametri sredstva za sušenje</li> <li>• Načini dovođenja topline</li> </ul>	<p>Statika sušenja je povezanost između početnih i konačnih parametara materijala i sredstva za sušenje na osnovi bilance materijala i topline. Iz statike sušenja određuje se potrošnja sredstva za sušenje i toplina.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Načini dovođenja topline</li> <li>• Vrsta prisutne vlage i vlažnost</li> <li>• Uvjeti sušenja (Temperatura, Tlak)</li> <li>• Trajanje sušenja</li> <li>• Režim sušenja (Način i Brzina sušenja)</li> <li>• Kapacitet proizvodnje</li> </ul>	<p>Kinetika sušenja utvrđuje vezu između promjene vlažnosti materijala s vremenom i parametrima procesa (svojstva i struktura materijala, hidrodinamički uvjeti, doticaj materijala sa sredstvom za sušenje, itd.). Iz kinetike sušenja određuje se trajanje i režim sušenja.</p>

### 2.1.2.2. Vrste sušenja

**PRIRODNO SUŠENJE** - Prirodni proces odvija se u struji velikih količina okolnog zraka bez utroška toplinske energije (npr. sušenje poljoprivrednih proizvoda, gdje se proces ne regulira a sušeni materijal ima relativno visoku konačnu vlažnost). Del Real Olvera (2016.) u svom radu govori o prirodnim procesima sušenja koji su prethodili današnjem industrijskom. Navodi da su naši preci koristili ovu operaciju za očuvanje hrane, najčešće zamatanjem u palmino lišće i zakopavanjem u vrući pijesak, kako bi se hrana sušila. Potom prijenosom topline vatre sušila se hrana, drvo, građevinski materijal i tekstil odnosno životinjska koža. Jedna od najstarijih metoda sušenja jest sušenje smrzavanje, što se koristili za sušenje hrane, koja se je noću smrzavala, a drugi dan otapala i sušila na otvorenom uz minimalan sadržaj vlage. Može se zaključiti da je ovaj proces preteča današnjem industrijskom sušenju sublimacijom odnosno liofilizacijom (del Real Olvera, 2016.).

Iako je ovakav proces sušenja ekološki i ekonomski povoljan, jer se provodi u struji okolnog zraka bez utroška energije, ovisan je o faktorima kao što su klimatski uvjeti, prostor odnosno okolina u kojoj se proizvod suši, brzini izmjene zraka, vremenu sušenja te o samoj morfologiji tvari koja se podvrgava ovom procesu. Gigler i suradnici proveli su ispitivanje jednoličnosti sušenja snopa stabljike vrbe (*Salix viminalis*) prirodnim procesom sušenja. Difuzija vlage unutar stabljike vrbe relativno je dugoročan proces kojeg uvjetuju relativna vlaga zraka i temperatura okoline. Istovremeno kratkotrajan proces isparavanja vlage s površine stabljike reguliraju klimatski uvjeti (kiša, vjetar, sunčevo zračenje). Njihov eksperiment je rezultirao ekološki i ekonomski pozitivnim ishodom, te su ustvrdili da prilikom skladištenja snopa stabljike u određenom vremenu, kada prevladava toplija klima, unutar stabljike prevladava ujednačeniji sadržaj vlage. Prosječni udio vlage približno je bio jednak ravnotežnom sadržaju vlage odnosno smanjio s oko 1,0 na između 0,2 i 0,3 [ $kg/kg^{-1}$ ] (Gigler et.al., 2000.).

**INDUSTRIJSKO SUŠENJE** – industrijski sektor razvijenih zemalja prirodne procese sušenja zamijenio je mehaničkim sušarama s funkcijom zagrijavanja svježeg zraka i ventilatorima, koji ubrzavaju cirkulaciju

zraka u sustavu. Iako ekonomski i ekološki nije povoljno, zbog znatne potrošnje energije i goriva, te cijene opreme, prednost ove vrste sušenja nad prirodnim što ne zauzima mnogo prostora, proces sušenja je brži te je proizvod bolje kvalitete (Solar Drying, ITDG, s.a.)

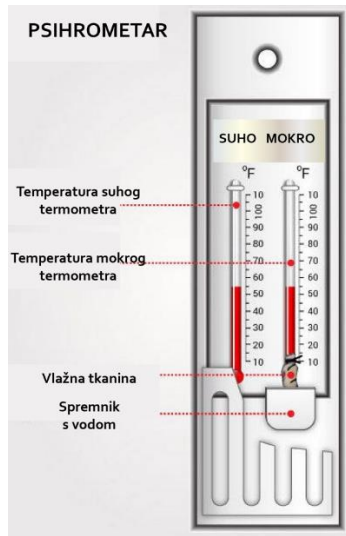
U industrijskim procesima sušenje vlažnog materijala se provodi i ubrzava pomoću predgrijanog sredstva za sušenje (zrak, dimni plinovi, para itd.). Nakon procesa sušenja iz sušnice izlazi osušeni materijal iz kojeg je apsorbirana vlaga. Sredstvo za sušenje koje je preuzelo dio vlage iz materijala odvodi se iz sušnice, npr. pomoću ventilatora. U tekstilnoj industriji najčešće korišteni način uklanjanja vlage iz tekstilnih vlaka, pređa i materijala bilo je mehaničkim putem i utjecajem topline. Mehaničko uklanjanje većine površinski vezane vlage putem centrifuge, propuštanjem uzoraka kroz valjke i vakuumskim uređajima, također je ekonomski puno povoljnije. Međutim inicijalnim mehaničkim uklanjanjem iz uzroka se ne može ukloniti sva vlaga. Vunenim materijalima se udio vlage smanjuje do 50%, a pamučnim uzorcima oko 80% (Spooner, 1939.). Izmjenom topline između različitih tekućina postiže se zagrijavanje i hlađenje plinova i tekućina što je zahtjev svakog proizvodnog procesa u tekstilnoj industriji. Za neizravno grijanje i hlađenje koriste se izmjenjivači topline kako bi se izbjegla kemijska reakcija zbog izravnog kontakta ili onečišćenje. Za predviđenu svrhu bitno je izabrati primjereni izmjenjivač topline te za zagrijavanje dovodne vode u kotlu pomoću ekonomajzera koristi se toplinska energija iz dimnih plinova u kotlu.

Za postupke bojadisanja i sušenja tekstila koristi se uglavnom lož ulje kao izvor energije, jer su to energetski zahtjevni procesi. Za postupak bojadisanja potrebna je temperatura zraka od 80°C, dok se tokom sušenja para iz kotla koristi za zagrijavanje cilindra preko kojih se prelaskom suši tekstilni materijal. U tom slučaju tekstil se prenosi preko vruće površine cilindra, koja se zagrijava uz pomoć pare iz kotla. Ovakav postupak sušenja vrućim cilindrima najčešće se koristi u fazama predsušenja. Postrojenja u tekstilnoj industriji imaju veliku potražnju za toplom vodom u procesima pranja tkanina. Proces sušenja i bojadisanja uzrokuju velike količine otpadnih voda i otpadne energije. Potrebno je usredotočiti se na te procese kako bi se povećala učinkovitost u tekstilnoj industriji. Tijekom sušenja stvara se otpadna toplina, koja se umjesto ponovne

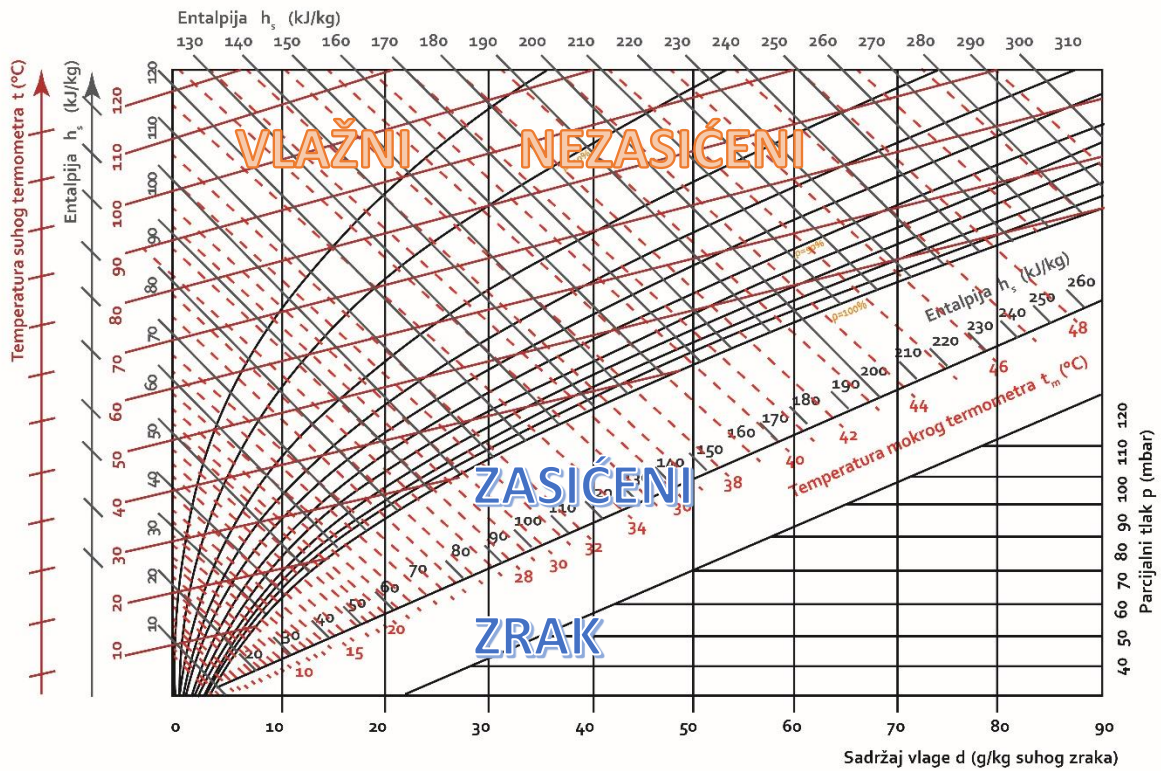
upotrebe i vraćanja u strojeve za sušenje, najčešće odbacuje u atmosferu. U sušarama se stoga mogu ugraditi cjevovodi kojima se ta otpadna toplina vraća u proces. Kako bi se izračunala točna potrošnja energije u procesima sušenja, potrebno je izračunati utrošak energije po kilogramu tvari (za izračun specifične potrošnje energije i intenzitet energije). Smanjenje potrošnje energije pruža konkurentnost na tržištu tekstila. Primjerice u turskim tekstilnim tvornicama pri mokroj obradi tekstila i pratećim procesima sušenja, često se vodi računa o povećanju energetske efikasnosti procesa (Ogura i Mujumdar, 2000; Ogura et.al., 2005; Tsotsas i Mujumdar, 2012.).

### **2.1.2.3. Mjerenje vlažnosti zraka**

Vlažnost zraka se mjeri PSIHROMETROM (slika 4), koji se sastoji od suhog i mokrog termometra. Spremnik mokrog termometra obložen je pamučnom tkaninom koja se neprekidno vlaži. Suhi termometar nalazi se u struji okolnog zraka i pokazuje temperaturu okoline. Suhi termometar pokazuje stvarnu temperaturu vlažnog zraka (viša od temperature mokrog termometra), a mokri temperaturu vode koja je isparila. Razlika između temperature suhog i mokrog termometra je mjera vlažnosti zraka. Proračun sušenja provodi se polazeći od materijala s njegovom početnom i konačnom vlažnosti. Proces sušenja može se promatrati kao teoretski i kao stvarni, a prikazuje se *Ramzinovim  $h,d$  dijagramom* (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.). Ovakav prikaz omogućuje utvrđivanje konačnih parametara, kao i specifične potrošnje zraka i topline, slika 5.



Slika 4. Psihrometar



Slika 5. Ramzinov h, d dijagram za vlažni zrak

Psihrometrom se mjeri smanjenje temperature, odnosno psihometrijska razlika  $\Delta T$ , zbog isparavanja vode izražena (Čunko, 1995.):

$$\Delta T = T_s - T_m$$

gdje je  $T_s$  - temperatura suhog termometra,  $T_m$  - temperatura mokrog termometra, a  $\Delta T$  ovisi o količini vlage u zraku. Što je količina vlage manja  $\Delta T$  će biti veći i obrnuto.

Jednadžba relativne vlažnosti zraka na temelju psihrometarske razlike slijedi:

$$H_r = [p_{zm} - K(T_s - T_m)] \cdot \frac{100}{p_{zs}}$$

gdje je:

$p_{zm}$  - parcijalni tlak u stanju zasićenja pri  $T_m$ ,

$p_{zs}$  - parcijalni tlak u stanju zasićenja pri  $T_s$ ,

$K$  – konstanta.

#### 2.1.2.4. Faze industrijskog sušenja tekstilnih materijala

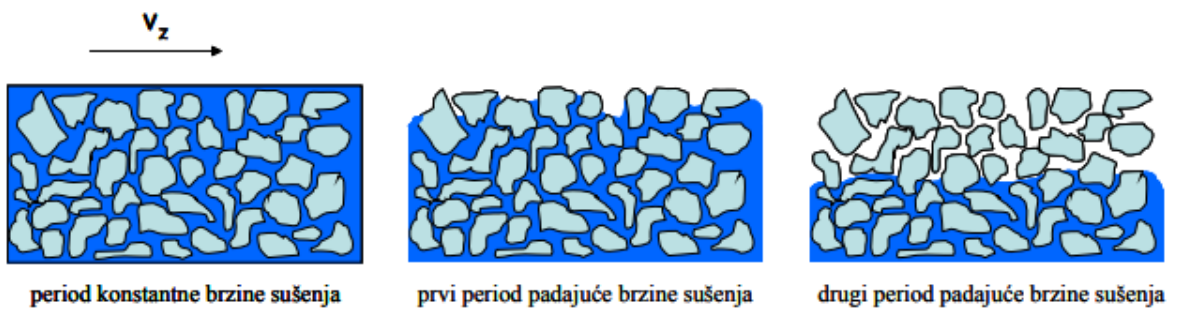
Proces sušenja može se opisati kroz tri karakteristična perioda, jer različiti materijali imaju različito vrijeme sušenja, te je potrebno analizirati sam proces sušenja kako bi skratili vrijeme odnosno ostvarili energetske uštede, a zadržali kvalitetu (Sito et.al., 2014.).

- *period zagrijavanja materijala (faza stabilizacije ili predsušenja)* – brzina sušenja raste od 0 do maksimalne vrijednosti; kod tankih materijala ovaj period je zanemariv
- *period konstantne brzine (faza sušenja)* – toplina dovedena materijalu se koristi kako bi vlaga isparila, dok se materijal ne zagrijava, temperature ostaje konstantna
- *period smanjivanja brzine sušenja (faza dosušivanja)* – dolazi do izražaja unutarnji otpor prijenosa vlage prema površini materijala koji je veći od prijenosa topline. Difuzija vlage je ovdje mehanizam koji upravlja cijelim procesom. Matematički model koji opisuje dominirajući mehanizam difuzije u periodu padajuće brzine sušenja jest Fickov drugi zakon (Anandharamakrishnan, 2017.):

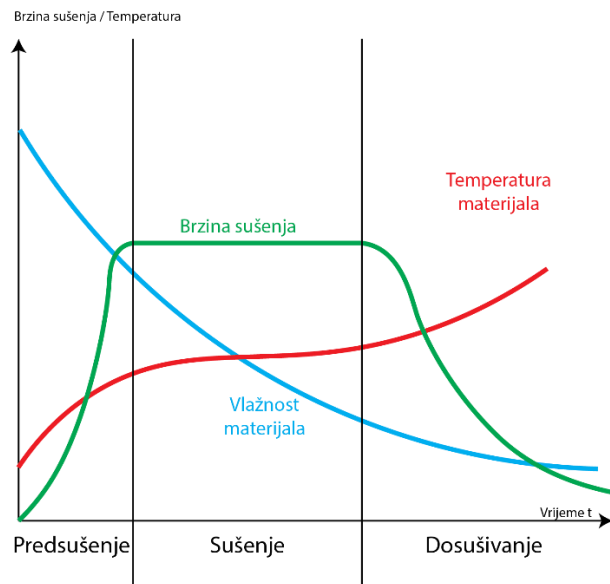
$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial l^2}$$

Gdje slijedi:

- $X$  – sadržaj vlage proizvoda [ $kg_{H_2O}/kg_{proizvoda}$ ],
- $t$  – vrijeme [s],
- $l$  – udaljenost u smjeru prijenosa mase [m],
- $D_{eff}$  – koeficijent difuzije ili difuzivnost vlage [ $m^2/s$ ].



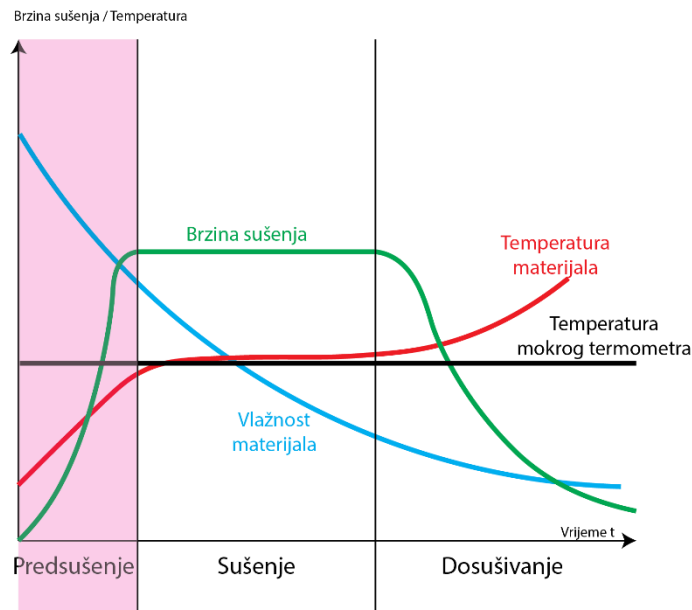
Slika 6: Karakteristični periodi sušenja materijala (IZVOR: Barun, 2008.)



Slika 7. Faze industrijskog sušenja

Faze industrijskog sušenja tekstilnih materijala:

1. **PREDSUŠENJE:** Predsušenje je kratka operacija pripreme materija u početku sušenja. Odnosi se na mehaničko uklanjanje vode vezane u vlaknima primjenom mehaničkih sila cijedenja, isisavanja (za materijale osjetljive na gužvanje, prelamanje i pritisak) i centrifugiranja (uređaj za cijedenje vlakana, pređa, plošnih proizvoda). Proizvod se zagrijava na temperaturu okoline pri čemu se povećava ishlapljivanje i oslobađa slobodna vlaga s površine. Hladni materijal se grije dok se ne postigne jednolična temperatura, odnosno **do temperaturne granice hlađenja**, odnosno temperature mokrog termometra, slika 8 (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

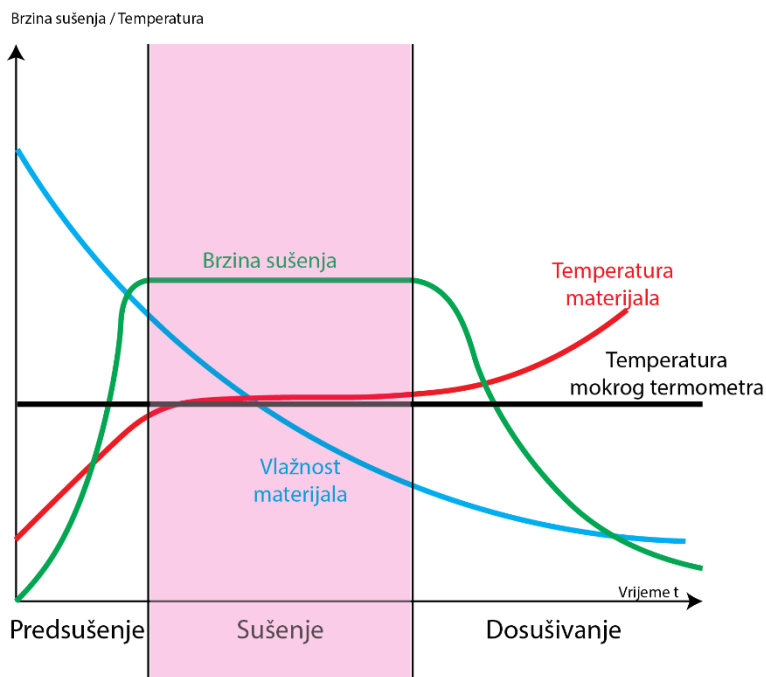


Slika 8. Faza predsušenja

2. **SUŠENJE:** Ishlapljivanje vlage s površine se nastavlja uz konstantnu visoku brzinu sušenja. Postepen mali porast temperature materijala (Temperatura materijala ostaje čitavo vrijeme jednaka temperaturi granice hlađenja, odnosno temperaturi mokrog termometra). U fazi sušenja iz materijala **ishlapljuje**

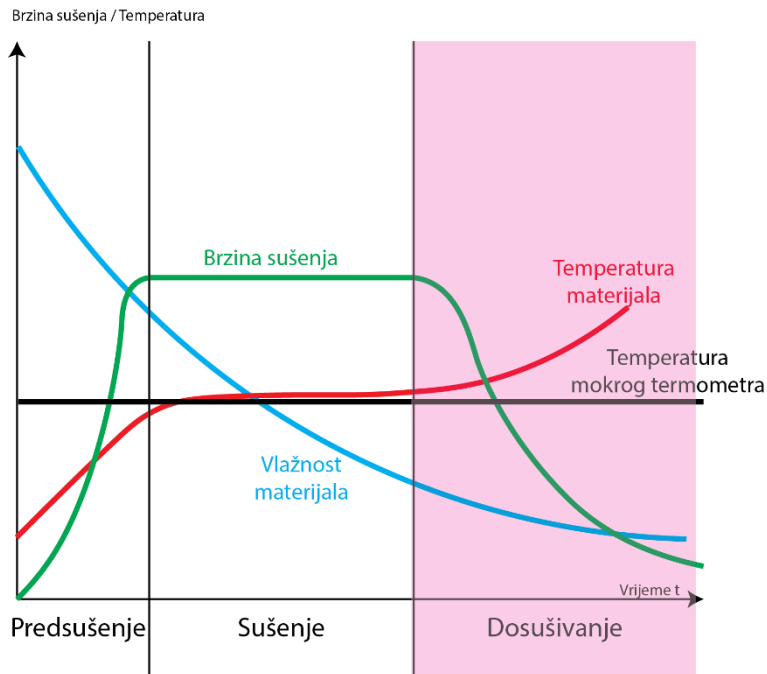


**slobodna vlaga** s izuzetno niskim tlakom vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temperature, slika 9 (Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.).



Slika 9. Faza sušenja

3. DOSUŠIVANJE: Smanjuje se brzina sušenja uslijed sporijeg oslobađanja vlage vezane u unutrašnjosti materijala (difuzija vlage iz unutrašnjosti dominantna). U fazi dosušivanja iz materijala isparava vezana vlaga (temperatura počinje rasti jer raste tlak pare vezane vlage). Materijal poprima temperaturu higroskopne granice hlađenja koja je viša od temperature granice hlađenja kod ishlapljivanja slobodne vlage, slika 10 (Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.).



Slika 10. Faza dosušivanja

#### 2.1.2.5. Vrste sušenja

Odabir sušare provodi se u odnosu na (Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

- Način dovođenja topline (konvekcijske i kontaktne),
- Vrsta medija za sušenje (zrak, plin, para),
- Tlak (atmosferski, vakuum),
- Provedba procesa sušenja (kontinuirana, diskontinuirana),
- Smjer strujanja zraka u odnosu na materijal (istosmjerno, protustrujno, unakrsno).

Obzirom na vrstu dovođenja toplinske energije razlikuje se (Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

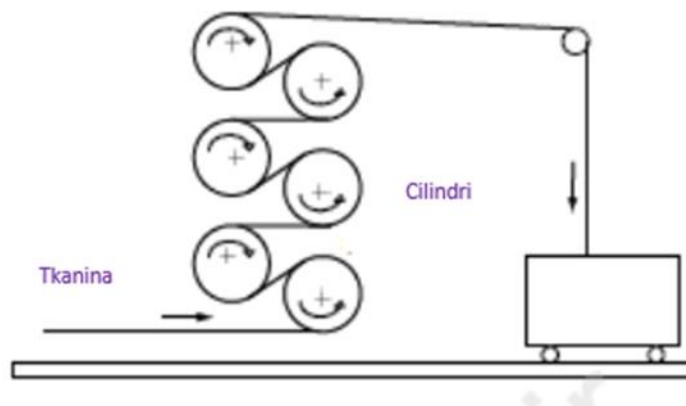
1. **Kontaktno ili kondukcijsko sušenje:** materijal se suši u direktnom kontaktu s grijanom površinom i oslobađa se zasićena vodena para (materijal prolazi rotirajućim cilindrima grijanim parom). Često u fazi predsušenja zbog postizanja dimenzijske stabilnosti materijala, nedostaci: preveliki pritisak

između dva grijana cilindra može oštetiti tkaninu, kod tkanina s nepostojanim obojenjem dolazi do transfera boje na cilindar.

2. **Konvekcijsko ili direktno sušenje:** vlažni materijal koji se suši u direktnom kontaktu sa strujom plinovitog medija (npr. zagrijani zrak, dimni plinovi). Toplinska energija medija za sušenje se konvekcijski predaje vlažnom materijalu i na taj način dolazi do ishlapljivanja i isparavanja vlage. Sušare ovog tipa najčešće se primjenjuju u industrijskoj praksi.
3. Kod **radijacijskog sušenja** se toplina neophodna za zagrijavanje vlažnog materijala i isparavanje vlage dovodi putem infracrvenog zračenja (predsušenje podnih obloga, nedostatak: velika potrošnja električne energije).
4. **Mikrovalno sušenje:** materijal se suši toplinom koja se generira unutar materijala, izloženog visokofrekventnom elektromagnetskom zračenju i na taj način se cijeli volumen materijala istovremeno zagrijava, što rezultira većim brzinama sušenja (sušenje voluminoznih proizvoda poput pređa, nedostaci: velika potrošnja energije, nejednoliko sušenje).
5. Kod **sublimacijskog sušenja** materijal se suši u zamrznutom stanju pri čemu dolazi do sublimacije, tj. prijelaza leda u vodenu paru.
6. Kod **dielektričnog sušenje** se zagrijavanje materijala odvija se u električnom polju visoke frekvencije.

Kod klasičnog sušenja toplina prelazi na materijal iz okolnog zraka **konvekcijom** ili **kondukcijom**, i kod toga su prisutni veliki gubici topline. Karakteristično je površinsko sušenje, nakon kojeg toplina prodire u unutrašnjost obrađivanog materijala, unutrašnjost materijala ostaje uvijek hladnija od površine.

Kod kondukcijskog sušenja materijal se suši u direktnom kontaktu s grijanom površinom i oslobađa se zasićena vodena para, istovremeno preveliki pritisak između dva grijana cilindra može oštetiti tkaninu, kod tkanina s nepostojanim obojenjem dolazi do transfera boje na cilindar (Carr et al., 2006.).



Slika 11: Shema mehanizma sušenja parnim cilindrima (IZVOR: Carr, Lee i Ok, 2006.)

**Konvekcijsko toplinsko sušenje** predstavlja spoj istovremene izmjene topline sa sredstva za sušenje na materijal koji se suši i izmjene tvari. Te dolazi do prijelaza vodene pare s površine materijala koji se suši u okolni nezasićeni zrak, transporta vode iz unutrašnjost materijala na njegovu površinu.

Najčešće korišteni postupci uklanjanja vlage iz tekstilnih uzoraka pod utjecajem topline uključuju uređaje za sušenje primjenom konvekcije i radijacije. Najraniji uređaji za uporabu u industrijskim procesima sušenja za potrebe tekstilne industrije bile su kontinuirane sušare (eng. *stenters*) (Minea, 2019.). Optimalni uvjeti u ovakvim sušara postižu se kontinuiranim strujanjem zraka pri brzinama koje ne smiju biti više od  $9,75 \text{ m/s}$  i parametrima temperature prilagođeni sušenju tekstilnih tvorevina u ovisnosti o njihovom sirovinskom sastavu, kako bi se izbjeglo eventualno oštećenje uzoraka (Spooner, 1939.). Ove kontinuirane sušare su potrebne kada proizvodni kapaciteti prelaze  $100 \text{ kg/h}$  (Land, 1991.).

Kontinuirane sušare su pogodnije u vidu protočnosti materijala, te svojim dimenzijama ne zauzimaju veliki prostor i ne troše puno goriva. Dok serijske odnosno diskontinuirane sušare imaju prednost zbog svoje jednostavne izvedbe, male cijene, jeftinije su za održavanje i imaju široku primjenu u praksi. Odabir vrste sušare ovisi o količini materijala odnosno proizvoda koji se suši, te o složenosti ili jednostavnosti procesa. Primjena konvekcijskog sušenja u industriji je jedna od najčešćih, no zbog svoje jednostavnosti kontrole temperature i vlage zraka koji isparava i odvodi vlagu, ona ima svojih nedostataka poput gubitka topline u

izlaznim plinovima, relativno dugo vrijeme sušenja, materijal se ne suši ravnomjerno te ima nisku efikasnost (Kemp, 2011.).

Konvekciju se može opisati kao prisilnu i slobodnu. Materijal koji se suši konvektivno proizvodi toplinu koja se razmjerno kreće iz toplijih u hladnija područja u materijalu kako bi vlaga isparila.

Vrste konvekcije (Keey, 1972.):

- slobodna i
- prisilna.

Dakle može se ustvrditi da je konvekcija prijenos topline unutar tvari, te kada je gibanje zraka uzrokovano razlikama u gustoći koje su rezultat promjena temperature po jedinici duljine u smjeru okomitom na površinu konstantne temperature, te se tada govori o slobodnoj konvekciji. Kada se govori o prisilnoj konvekciji kretanje medija se ostvaruje mehaničkim putem (Keey, 1972.).

Primjena mikrovalova i njihovih svojstava koristi se u procesima predobrade u iskuhavanju i bijeljenju, bojadisanju, procesima sušenja, te za uništavanje moljaca u vunanim materijalima i kod kontinuiranog mjerenja niskih sadržaja vlage (Katović et al., 2005.).



Slika 12: Uređaj za poboljšanu naknadnu obradu tekstilnog materijala primjenom mikrovalova (IZVOR: Katović i Bishof, 2004.)

Na slici 12 je prikazana osnovna izvedba **mikrovalne sušare**. To je uređaj koji se koristi za poboljšanje učinkovitog sušenja očišćenog ili obojenog tekstilnog materijala pomoću mikrovalova. Planarni mikrovalni uređaj za obradu tekstilnih materijala sastoji se od magnetrona, valovoda, bočnog otvora, apsorbera mikrovalova, materijala. Magnetron proizvodi mikrovalove, koji se pomoću vodiča vode u unutrašnji prostor mikrovalne sušnice. Valovodi točno određenih dimenzija postavljeni su u obliku meandra, a tekstilni materijal u nategnutom i raširenom obliku vođen valjcima za namatanje, prolazi okomito kroz bočne otvore valovoda točno određene visine uz planarno djelovanje mikrovalova. Zbog posebne konstrukcije otvora za prolaz tkanine bitno je smanjena mogućnost neželjenog izlaza elektromagnetskog zračenja. Valovodi usmjeravaju djelovanje mikrovalova na tekstilni materijal, dok se na kraju valovoda nalazi se apsorber preostalih mikrovalova. Jakost električnog polja eksponencijalno opada od izvora energije (magnetrona). Ovo dovodi do nejednolike raspodjele energije po širini, a to se može izbjeći postavljanjem magnetrona na različitim stranama tekstilnog materijala ili pak s parnim brojem meandara valovoda. Kako bi se spriječila nejednolika raspodjela energije duž širine materijala, valovodi su konstruirani u obliku meandera. Važno je da otvor u valovodu bude točno u centru, a materijal treba biti vođen pod pravim kutom, jer su tada efekti obrade najbolji, a gubici energije najmanji. Na gubitak energije utječe tekstilni materijal koji prolazi kroz valovod jer on preuzima dio energije na sebe. Pri tome utjecaj ima količina vlage, te debljina i širina materijala (Katović i Bischof, 2004.).



Slika 13: Prikaz prijenosa topline mikrovalnim zračenjem i konvencionalnim zagrijavanjem (IZVOR: Banu Yeşim Büyükkakinci, 2011.)

Ovim se načinom smanjuje problem gubitka energije primjenom mikrovalnog zagrijavanja. Smanjenje gubitka energije iznosi do čak 60 – 70% u odnosu na direktno sušenje. Elektromagnetska energija prodire u unutrašnjost materijala gdje se konvertira u toplinsku energiju, te je smjer kretanja topline, odnosno zagrijavanja iz unutrašnjosti prema površini materijala jednoličniji, kao što je prikazano na slici 13. Također se postiže bolja kvaliteta obrađivanog materijala (Katović et al., 2005., Buyukakinci, 2012.). Uporaba mikrovalnih sušara tekstilnih tkanina i uzoraka često nije ekonomski isplativa, jer takvi uređaji zahtijevaju velike količine električne energije, koja je i do tri puta skuplja od toplinske energije stoga je od velike važnosti postići tehnička poboljšanja u skladu s ekonomskom isplativošću (Griffin i Hendrix, 1986.).

Pri radu **visokofrekventne sušare** dipolne molekule vode, koje se nalaze u tekstilnom materijalu, orijentiraju se prema električnom polju pod utjecajem punjenja elektroda. Tekstilni se materijal kod visokofrekventne sušare provodi kontinuirano između dvije kondenzatorske ploče na koje je priključen visokofrekventni tok. Kako se smjer polja mijenja vrlo velikom brzinom od 27 milijuna puta u sekundi, broj okretanja dipolnih molekula vode u materijalu proizvodi toplinu trenja, koja uzrokuje isparavanje vode. Toplina se oslobađa djelovanjem elektromagnetskih valova visoke frekvencije (Jones i Rowley, 1996.).

Prednost visokofrekventne sušare je u tome što do razvijanja topline dolazi samo ukoliko je materijal vlažan. Do razvijanja topline dolazi jednoliko po cijeloj dubini materijala, a prestaje kada u materijalu više nema vode. Ovaj način sušenja naročito je pogodan za sušenje debelih voluminoznih materijala kao što su bale vune, križni namotci, vitice te svežnjevi robe u odjevnoj industriji. Još jedna od pogodnosti dielektričnog sušenja je u tome što daje puno ravnomjernije rezultate sušenja i poboljšava kvalitetu proizvoda. Zbog visokofrekventnog električnog polja tekstilni materijal koji se suši ne smije na sebi imati nikakve komadiće metala zbog mogućnosti stvaranja električnog luka. Što se tiče toplinskih gubitaka, oni se smanjuju primjenom elektromagnetske energije raspršene izravno u osušenom materijalu (Kudra i Mujumdar, 2009.).

**Sušenje radijacijom** također se temelji na utjecaju elektromagnetske energije, čije se zračenje nalazi u infracrvenom spektralnom području. Kod radijacijskog sušenja energija za zagrijavanje se prenosi elektromagnetskim zračenjem pa se apsorpcijom u tekstilnom materijalu pretvara u toplinsku energiju potrebnu za sušenje. Takva vrsta sušenja je pogodna za tanke tekstilne materijale ili materijale male debljine poput papira (Tripalo i Viličić, 1992.)

**Liofilizacija ili sušenje smrzavanjem** je tehnika sušenja koja se pretežito koristi farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Još se naziva i sublimacijsko sušenje.

Sušenje smrzavanjem sastoji od tri ključna koraka (Czyż i Pniewski, 2016.):

1. Zamrzavanje odnosno očvršćivanje materijala,
2. Primarno sušenje odnosno sublimacija leda i
3. Sekundarno sušenje odnosno desorpcija vlage.

Prednost ove vrste sušenja jesu uvjeti provedbe procesa, niska temperatura (*do* 30°C), nizak tlak ( $10^{-2}$  bar), a smrznuta vlaga se uklanja sublimacijom te ne uzrokuje degradaciju materijala (Tripalo i Viličić, 1992.).

Nedostatak sušenja smrzavanjem je u tome što je limitirano uglavnom na farmaceutsku i prehrambenu industriju, a također mora se voditi računa o raznim faktorima koji utječu na sam proces (temperatura, brzina hlađenja, optimizacija parametara, očuvanje proizvoda i sl.). Studije su pokazale kako je također veliki problem ove metode dugoročna stabilnost i skladištenje proizvoda te se stoga kontinuirano radi na poboljšanju ove metode (Tripalo i Viličić, 1992.; Czyż i Pniewski, 2016.).

## **2.2. Primjeri primjene sušenja u tekstilnoj industriji**

Najčešće metode poboljšanja obuhvaćaju sljedeće procese sušenja (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

1. **s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici** (\*dvokratno zagrijavanje vanjskim kaloriferom nakon dobave ventilatorom i dodatno u sušnici),



2. **s višestupanjskim zagrijavanjem zraka** (\*kod osjetljivih materijala, gdje se tijekom procesa moraju izbjegavati povišene temperature uz postepeni porast sadržaja vlage zraka),
3. **s optokom ili recirkulacijom** (\*kod osjetljivih materijala, a provodi se jednoličnom brzinom neovisno o vlažnosti i temperaturi zraka iz okoliša. Dio iskorištenog zraka ispušta u okoliš, a preostali dio ulazi ponovno u proces i miješa se sa svježim zrakom, a jednaka svojstva postižu se reguliranjem optočnog zraka pomoću **troputnog ventila**. Masa svježeg zraka jednaka je masi zraka ispuštenog u okoliš. Smjesa svježeg i optočnog zraka s protokom posredstvom ventilatora uvodi se u zagrijač te nakon zagrijavanja u sušnicu),
4. **s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom** (\*primjenjuje se u industriji radi sniženja potrošnje topline. U ovakvom procesu iskorišteni zrak koji izlazi iz sušnice usmjeruje se u izmjenjivač topline (regenerator ili rekuperator). Tu se toplina iskorištenog zraka predaje svježem zraku iz okoliša koji se predgrijava prije ulaza u kalorifer.),
5. **s kombinacijom optoka i regeneracije topline.**

**Tab. 2:** Princip uklanjanja vlage ovisno o fazi industrijskog procesa

POSTUPAK	FAZA	PRINCIP UKLANJANJA VLAGE
Priprema pređe i tkanje	Predsušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehaničko istiskivanje</li> <li>• Centrifugalno uklanjanje</li> </ul>
	Sušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondukcijsko uklanjanje</li> </ul>
Obrada tkanina	Predsušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehaničko istiskivanje</li> <li>• Vakuumsko uklanjanje (*idealno za higroskopne materijale kod kojih postoji opasnost da bi mogli promijeniti svojstva ili se uništiti ako ih se izloži visokim temperaturama)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondukcijsko uklanjanje</li> </ul>
	Sušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondukcijsko uklanjanje</li> <li>• Konvekcijsko zagrijavanje (tunelne sušare s cirkulirajućim vrućim zrakom)</li> </ul>
Bojadsanje	Predsušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehaničko istiskivanje</li> <li>• Vakuumsko uklanjanje</li> <li>• Kondukcijsko uklanjanje</li> <li>• Infracrveno zagrijavanje</li> <li>• Radiofrekvencijske i mikrovalne sušare</li> </ul>
	Sušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondukcijsko uklanjanje</li> <li>• Konvekcijsko zagrijavanje</li> </ul>
Tekstilni tisak	Sušenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konvekcijsko zagrijavanje</li> </ul>

### 2.3. Proračun procesa sušenja

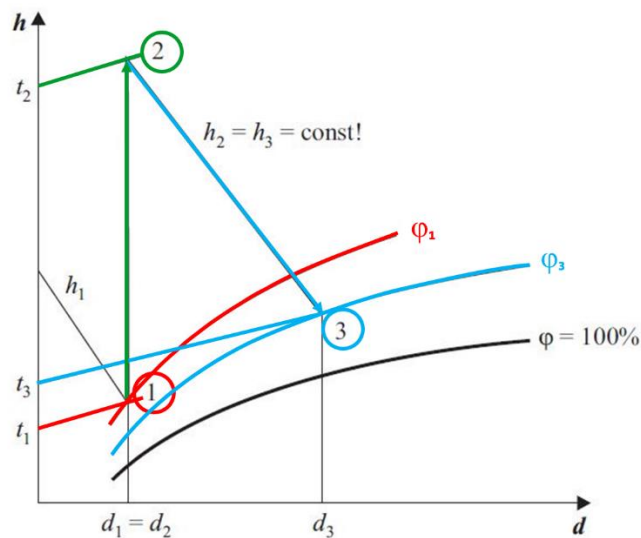
U proračunima procesa sušenja je potrebno odrediti količinu vlage koja se odstranjuje iz materijala, količinu suhog materijala koji se dobiva kao rezultat sušenja, te potrebnu količine zraka i potrošnju topline (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

To se određuje izračunom (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

- bilance materijala i
- bilanca topline.

Teoretski proces sušenja se prikazuje *Ramzinovim h,d dijagramom* za vlažni zrak. TOČKA 1: U teoretskom procesu za zadanu početnu temperaturu zraka  $t_1$  i relativnu vlažnost  $\varphi_1$  nalazi se u dijagramu stanje 1. Zrak u ovom stanju ima sadržaj vlage  $d_1$  i entalpiju  $h_1$ .

Vertikala 1-2: označuje proces zagrijavanja zraka u kaloriferu pri  $d_1 = d_2 = const$ . U sjecištu izoterme i sadržaja vlage  $d_2$  nalazi se točka 2 kod  $t_2$  je karakterizira stanje zraka na izlazu iz kalorifera, tj. na ulazu u sušnicu. Teoretski proces sušenja odvija od stanja 2 do 3 uz konstantnu entalpiju  $h_2 = h_3$ . Konačno, stanje zraka 3 dobiva se u sjecištu konačne temperature zraka  $t_3$  ili konačne relativne vlažnosti  $\varphi_3$  s konstantnom entalpijom  $h_2 = h_3$ , slika 14.



Slika 14. Teoretski proces sušenja u h, d dijagramu

Kod teoretskog proračuna procesa sušenja upotrebljava se izraz za specifičnu potrošnju zraka odnosno potrošnju zraka po kg vlage koja se udaljava iz materijala ( $kg/kg_{vlaga}$ ) je:

$$D_{z spec.} = \frac{D_z}{D_{H_2O}} = \frac{1}{d_3 - d_2}$$

Te izraz za ukupnu specifičnu potrošnju topline u sušari:

$$q = \frac{h_2 - h_1}{d_3 - d_1} + \sum q - c_{pH_2O} \cdot t_{Mu}$$

Sukladno gore navedenim izrazima, zatim uz primjenu oznaka i simbola na prikazanom h,d dijagramu, te polaznu postavku da su gubici zanemarivi dolazi se do izraza za jediničnu odnosno specifičnu potrošnju topline ( $kJ/kg_{vlag}$ ):

$$q_t = \frac{h_2 - h_1}{d_3 - d_1},$$

Odnosno specifičnu potrošnju zraka ( $kg/kg_{vlag}$ ):

$$D_{z spec} = \frac{1}{d_3 - d_1}$$

Za razliku od prethodnog, stvarni proces sušenja uključuje dodatne gubitke topline, stoga se specifična potrošnja topline u kaloriferu ( $kJ/kg_{vlag}$ ) izražava kao:

$$q_K = D_{z spec} \cdot \Delta h_z + q_M + q_{TR} + q_G - c_{pH_2O} \cdot t_{Mu} - q_D$$

ili

$$q_K = D_{z spec} \cdot (h_2 - h_1)$$

što izjednačavanjem daje:

$$D_{z spec} \cdot (h_3 - h_2) - D_{z spec} \cdot (h_2 - h_1) = (c_{pH_2O} \cdot t_{Mu} - q_D) - (q_M + q_{TR} + q_G),$$

$$D_{z spec} \cdot (h_3 - h_2) = (c_{pH_2O} \cdot t_{Mu} - q_D) - (q_M + q_{TR} + q_G).$$

Kada se označi sa  $\Delta$ :

$$D_{z spec} \cdot (h_2 - h_1) = \Delta,$$

te uz izraz:

$$D_{z spec} = D_z / D_{H_2O} = 1 / (d_3 - d_2),$$

dobivamo osnovni izraz za toplinsku bilancu za konvekcijsku sušaru:

$$\Delta = \frac{h_2 - h_1}{d_3 - d_1}.$$

Za industrijsku praksu vrijedi da pri provedbi procesa sušenja u izraz toplinske bilance veličina  $\Delta$  može biti jednaka 0 te imati pozitivnu ili negativnu vrijednost (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

### 2.3.1. Bilanca materijala

Bilanca materijala obuhvaća (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.):

- masu materijala koji se suši,
- masu vlage koja se mora ukloniti (ukupna količina vlage tijekom procesa ostaje nepromijenjena) kao i
- količinu zraka koji sudjeluje u procesu sušenja.

Masa apsolutno suhe tvari koja prolazi kroz sušnicu:

$$D_S = D_{Mvu} \cdot \frac{100 - x_u}{100} = D_{Msi} \cdot \frac{100 - x_i}{100}$$

Gdje je:

- $D_S$  (kg/h) je masa apsolutno suhe tvari u vlažnom materijalu,
- $D_{Mvu}$  je masa vlažnog materijala na ulazu u sušnicu,
- $D_{Msi}$  (kg/h) je masa suhog materijala na izlazu iz sušnice,
- $x_u$  (%) je vlažnost materijala na ulazu u sušnicu,
- $x_i$  (%) je vlažnost materijala na izlazu iz sušnice.

Vlažnost (ili sadržaj vlage) materijala prikazuje se kao količina vlage prisutna u jediničnoj masi suhog materijala.

Toplina koju je potrebno dovesti materijalu kako bi vlaga isparila dana je jednadžbom:

$$Q = D_{H_2O} \cdot \lambda = \alpha \cdot A \cdot \Delta T;$$

- $Q$  [W] potrebna toplina
- $\lambda$  [kJ/kg] latentna toplina isparavanja
- $\alpha$  [W/m<sup>2</sup>K] koeficijent prijelaza topline
- $A$  [m<sup>2</sup>] površina isparavanja

- $\Delta T [K]$  razlika temperatura.

Masa vlage uklonjene iz materijala prilikom sušenja:

$$D_{H_2O,ulaz} = D_{H_2O,izlaz}$$

$$D_{H_2O} = D_{Mvu} - D_{Msi}$$

$$D_{Mvu} \cdot \frac{x_u}{100} + D_z \cdot d_2 = D_{Msi} \cdot \frac{x_i}{100} + D_z \cdot d_3$$

$$D_{H_2O} = D_z(d_3 - d_2)$$

Gdje je:

- $D_{H_2O}$  (kg/h) je masa vlage uklonjene iz materijala prilikom sušenja,
- $D_z$  (kg/h) masa apsolutno suhog zraka koji prolazi kroz sušnicu
- $D_{Mvu}$  (kg/h) je masa vlažnog materijala na ulazu u sušnicu,
- $D_{Msi}$  (kg/h) je masa suhog materijala na izlazu iz sušnice,
- $d_3$  (kg/kg<sub>suhog zraka</sub>) je sadržaj vlage na izlazu iz sušnice,
- $d_2$  (kg/kg<sub>suhog zraka</sub>) je sadržaj vlage na ulazu u sušnicu.

Masa apsolutno suhog zraka koji protječe kroz sušnicu:

$$D_z = \frac{D_{H_2O}}{d_3 - d_2}$$

### 2.3.2. Bilanca topline

Toplinska bilanca sušare provodi se zbog utvrđivanja:

- dovedene količine topline za uklanjanje vlage,
- odvedene topline, tj. relevantnih gubitaka topline.

Ukupno dovedena toplina u sušaru:

$$D_z \cdot c_{pz} \cdot t_1 + D_{Mi} \cdot c_{pM} \cdot t_{Mu} + D_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot t_{Mu} + D_{TR} \cdot c_{pTR} \cdot t_{TRu} + Q_K + Q_D$$

Gdje je:

- $D_z \cdot c_{pz} \cdot t_{z1}$  je toplina dovedena zrakom,
- $D_{Msi} \cdot c_{pM} \cdot t_{Mu}$  je toplina dovedena materijalom,
- $D_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot t_{Mu}$  je toplina dovedena vlagom,
- $D_{TR} \cdot c_{pTR} \cdot t_{TRu}$  je toplina dovedena transportnim uređajima,
- $Q_K$  je toplina dovedena s izvorom topline u kaloriferu,
- $Q_D$  je dodatni izvor topline.

Ukupno odvedena toplina iz sušare:

$$D_z \cdot c_{pz} \cdot t_3 + D_{Mi} \cdot c_{pM} \cdot t_{Mi} + D_{TR} \cdot c_{pTR} \cdot t_{TRi} + Q_G$$

$$Q = Q_K + Q_D$$

\*ukupna potrošnja topline u sušari ( $Q$ ) je zbroj potrošnje topline u kaloriferu ( $Q_K$ ) i dodatne topline dovedene neposredno u sušnicu ( $Q_D$ ).

Gdje je:

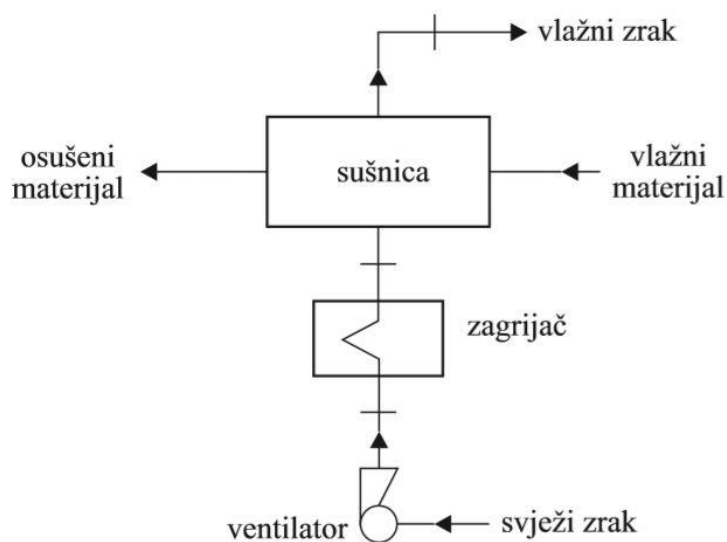
- $D_z \cdot c_{pz} \cdot t_3$  je toplina odvedena zrakom,
- $D_{Msi} \cdot c_{pM} \cdot t_{Mi}$  je toplina odvedena materijalom,
- $D_{TR} \cdot c_{pTR} \cdot t_{TRi}$  je toplina odvedena transportnim uređajima,
- $Q_G$  su gubici topline u okoliš.

Dovod topline jednak je odvodu topline:

$$Q = D_z \cdot (t_{z3} - t_{z1}) + D_{Msi} \cdot c_{pM} \cdot (t_{Mi} - t_{Mu}) + D_{TR} \cdot c_{pTR} \cdot (t_{TRi} - t_{TRu}) + Q_G - D_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot t_{Mu}$$

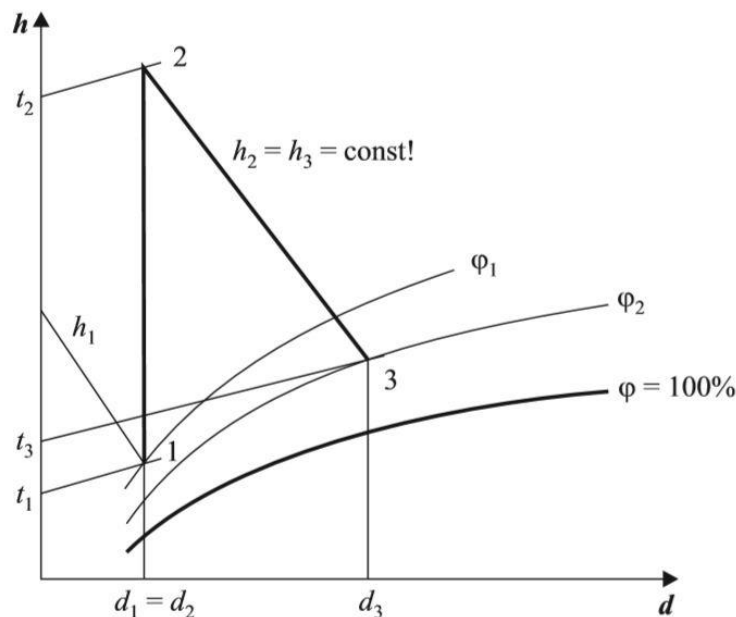
### 2.3.3. Proces sušenja

Sušenje s jednokratnim strujanjem zraka, koje je najrasprostranjenije, naziva se osnovni ili jednostavni proces. Iz prethodnog slijedi da se zrak dobavljen pomoću ventilatora zagrijava u kaloriferu (zagrijaču) i jednokratno prolazi kroz sušnicu (slike 15 i 16). Ovakav proces međutim ne zadovoljava materijale osjetljive na visinu temperature. Poboljšani uvjeti procesa sušenja i bolje iskorištenje topline zraka postiže se različitim metodama koje istovremeno zadovoljavaju svojstva materijala, a energetski su povoljnije (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).



Slika 15. Shematski prikaz jednostavne sušare (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)





Slika 16. Jednostavan proces sušenja prikazan u  $h, d$  dijagramu (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Kod jednostavnog procesa sušenja prikazanog shematski na slici 15, prvotno zagrijani nezasićeni zrak struji određenom brzinom iznad vlažnog materijala odnosno tvari te veže vodu iz materijala, dok su entalpije zraka jednake na ulazu i izlazu iz sušare. Kroz sušaru prolazi masa apsolutno suhog zraka  $D_z$  ( $kg/h$ ) u stanju 1, dok je na izlazu u stanju 2.

Masu vlage  $D_{H_2O}$  ( $kg/h$ ) uklonjene iz materijala računa se prema formuli:

$$D_{H_2O} = D_{Mu} - D_{Mi}.$$

Masa vlage  $D_{H_2O}$  ( $kg/h$ ) uklonjena iz materijala jednaka je razlici mase vlažnog i suhog materijala.

Također količina odnosno potrošnja zraka po  $kg$  vlage koja se uklanja iz materijala ( $kg/kg_{vlaga}$ ) izračunava se prema izrazu:

$$D_{z spec.} = \frac{D_z}{D_{H_2O}} = \frac{1}{d_3 - d_2},$$

Gdje su  $d_3$  i  $d_2$  ( $kg/kg_{suhog\ zraka}$ ) sadržaj vlage na izlazu iz sušnice odnosno sadržaj vlage na ulazu u sušnicu (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

## 2.4. Uređaji za sušenje primjenom topline u tekstilnoj industriji

### 2.4.1. Sušare s transportnom trakom

Princip rada ove vrste sušara je vrlo jednostavan. Uzorci za sušenje promjera 1 *do* 50 *mm* se prenose kroz sušaru putem transportnih traka, koje se kontroliraju elektro-pneumatskim sustavima, pri čemu se uzorci suše upuhivanjem zraka kroz podlogu na kojoj je položen uzorak (Mujumdar, 2015.). Ovakve vrste sušara se također sastoje od više komora za sušenje (2 do 7) duljine ok 2 m, a širina transportne trake varira od 1600 *do* 3350 *mm*. Maksimalna radna temperatura sušenja uzoraka je oko 170°C, a svaka je komora opremljena s dva ventilatora. Komore se nastavljaju jedna na drugu tako da su ventilatori jedne komore dijagonalno postavljeni na ventilatore druge komore, kako bi se prolaskom kroz pojedini modul zrak sušio prvo na jednoj uzdužnoj strani tekstilnog materijala, a prilaskom kroz drugu komoru na suprotnoj uzdužnoj strani tekstilnog materijala. Tekstilni materijali su položeni na transportnu traku u relaksiranom stanju bez sustava napinjanja koji je specifičan kod primjerice kontinuiranih modularnih sušara. Nedostatak ovih sušara je relativno mala količina vlage koja se izdvaja u jednom prolasku tekstilnog materijala kroz sustav komora za sušenje. Zagrijani zrak prolazi kroz tekstilni uzorak izložen djelovanju dielektričnog polja, npr. mikrovalovima frekvencije 2450 MHz, infracrvenim ili ultrazvučnim zračenjem. Primjena mikrovalnih sušara s transportnom trakom je ograničena na tekstilne materijale bez sintetičkih vlakana ili dodataka metalnih niti (Timar-Balazsy i Eastop, 1998.). Ove vrste sušara se najčešće koriste za sušenje namotaka pređa, klupka i slobodne pređe primjenom infracrvenog zračenja. Takvi uređaji imaju dodatne odjeljke za usisavanje i upuhivanje zraka centrifugalnim ventilatorima, smještenim ispod transportne trake. Ventilatori u odjeljcima usmjeravaju kontroliranu količinu zraka kroz proizvod koji je izložen djelovanju radio - frekvencijskog polja, tako da se proces sušenja odvija pri temperaturama koje obično ne prelaze 60 – 70°C. Zrak koji prolazi kroz proizvod također povećava energetske učinkovitost, tako da su troškovi sušenja smanjeni za 15-30% u odnosu na standardnu "RF" tehnologiju ([www.stalam.com](http://www.stalam.com)).

#### 2.4.2. Kontinuirane sušare

Sušenje tekstila jedan je od energetski najintenzivnijim postupaka u tekstilnoj industriji, a kontinuirane modularne sušare su najčešće korišteni uređaji za sušenje. Spadaju u sušare sa zračnim strujama (eng. *impingement dryers*). Zračne struje velike brzine se upuhuju na površinu uzorka za sušenje kako bi se postiglo relativno brzo sušenje uzoraka oblikovanih u tanke listove koji se kontinuirano kreću kroz sušaru (Mujumdar, 2015.). Sustav kontinuiranih modularnih sušara uključuje same jedinice za sušenje zajedno s cirkulirajućim ventilatorima i ventilatorima induciranog ispuha, vrelouljnim kotlom i cirkulacijskom pumpom za ulje. Eksergijska efikasnost ovog sustava se kreće između 28 do 35% (Cay et al., 2007.).

Kontinuirana sušara se sastoji od 5 do 10 modularnih komora za sušenje s individualnom kontrolom temperature. Svaka komora ima mlaznice za vrući zrak koje raspršuju zrak po gornjoj i donjoj površini tkanine, pri brzinama *od 10 do 100 m/s* i temperaturama u rasponu *od 100 do 350°C* (Mujumdar, 2015.). Tkanina je poprečno zategnuta kopčama ili iglama i prolazi kroz komoru pri brzinama *od 0,17 do 1.7 m/s*. Vлага se uklanja po principu prisilne konvekcije, a vlažni zrak nastao miješanjem isparene vlage s površine tkanine i zraka za sušenje se uklanja ispušnim sustavom, čime se sprječava nakupljanje suviška vlage uz samu površinu tkanine. U kontinuiranim sušarama s direktnim grijanjem zraka, prirodni plin sagorijeva u komori, a temperatura sredstva za sušenje regulira se ubrizgavanjem zraka na sobnoj temperaturi (Mueller, 2006.; Santos et al., 2015.).

Kontinuirane modularne sušare imaju veliku primjenu u procesima bojadisanja i završne obrade tekstila. Prema procjenama pri završnoj obradi proizvodnje tkanina, svaki se uzorak tijekom proizvodnog procesa suši 2 do 3 puta uporabom kontinuiranih sušara (Europska komisija, 2003.). Građa kontinuirane sušare se sastoji od para beskonačnih lanaca umetnutih u vodilice za transport tekstilnih uzoraka. Tekstilna tkanina je uzdužnim rubovima pričvršćena na transportne lance pomoću kopči. Ulaskom u sustav sušare lanci se razdvajaju i napinju tkaninu do željene širine. Kao i kod postupaka kondicioniranja i fiksiranja, postupcima sušenja također se utječe na finalne dimenzije tkanina (duljina, širina). Brzina sušenja tkanina kreće se

između 10-100 m/min, a temperature sušenja mogu prelaziti 200°C. Konačna temperatura sušenja u sustavu kontinuiranih sušara postiže se različitim načinima od plinski grijanih sušara do zagrijavanja toplinskim sustavima zagrijavanjem fluida, koji služe kao prenosilac topline. Plinom grijane kontinuirane sušare se mogu prilagoditi za široki raspon operativnih temperatura dok sustavi za zagrijavanje cirkulacijom fluida zahtijevaju instalaciju vrelouljnog kotla i distribucijskog sustava cijevi. Takav je sustav manje učinkovit od plinskog sustava, a također zahtjeva veće investicijske troškove i troškove održavanja. Nedostatak sustava za zagrijavanje cirkulacijom fluida je nužnost ugradnje izmjenjivača topline jer se prijenos topline može provesti samo indirektno (Uddin, 2014.). U današnje vrijeme sustavi kontinuiranih sušara također se često zagrijavaju parom, ali su ograničeni postizanjem maksimalne temperature od maksimalno 160°C. Stoga se takvi sustavi upotrebljavaju samo za sušenje i ne mogu se koristiti za istovremeno termofiksiranje i kondicioniranje. U svim kontinuiranim sušarama bez obzira na izvor topline, se vrući zrak upuhuje suprotno od smjera kretanja tkanine, a zatim se primjenjuje recirkulacija zraka. Dio ovog zraka se iscrpljuje i miješa sa svježim zrakom. Da bi se osigurala bolja kontrola, kontinuirane sušare su modularne te se obično sastoje između dva do osam modula. Svaki je modul opremljen temperaturnim senzorom, plamenikom / izmjenjivačem topline, ventilatorima, ispušnim sustavom i prigušivačem (Hasanbeigi, 2010.).

Okolišni zrak temperature  $T_a$  se zagrijava u komori za izgaranje ili u izmjenjivaču topline do temperature  $T_0$ , za koju je potrebna energija  $h_0$ . Grijani zrak propuhava se kroz mlaznicu kako bi se proizvod osušio. Ovi uvjeti rezultiraju temperaturom proizvoda  $T_s$ . Isparavajuća masa ima entalpiju  $h_v$ . Struja zraka, koji se upuhuje kroz mlaznicu, ovisi o unutarnjem promjeru  $d$  pojedine mlaznice, nagibu  $t$  između mlaznica i brzina oslobođenog zraka  $v$  (Tsotsas i Mujumdar, 2014.).

Najveća prednost kontinuiranih sušara je rad na visokim operativnim temperaturama sušenja od 200°C što omogućuje istovremeno termofiksiranje i kondicioniranje nakon bojadisanja, postizanje dimenzijske stabilnosti i završnih dimenzija tkanina, mogućnost završnog apliciranja kemikalija za obradu tkanina,

kontroliranje ravnotežne vlage, površinske mase, sakupljanja i mogućnost fiksiranja vodonepropusnog sloja tkanina (Purushothama, 2018.).

**Tab. 3.** Potrošnja energije u kontinuiranoj sušari (Hasanbeigi, 2010)

Komponenta	Energetska potrošnja (GJ/tona proizvoda)	Postotak ukupne energetske potrošnje (%)
Sustav isparivača	2,54	41
Sustav za zagrijavanje zraka	2,46	39,7
Sustav za sušenje tkanine	0,29	4,6
Kućište	0,39	6,3
Transportni sustav s lancima	0,09	1,5
Pogonski sustav	0,43	6,9
Ukupna energetska potrošnja	6,20	100

### 3. Eksperimentalni dio - Potencijalna poboljšanja procesa sušenja

Potencijalna poboljšanja procesa sušenja (Budin i Mihelić-Bogdanić, 1994; 2011):

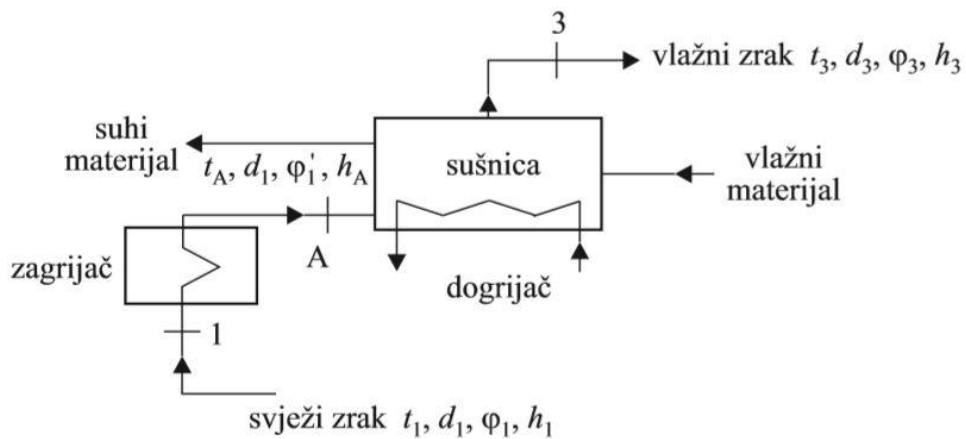
- s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici (\*dvokratno zagrijavanje vanjskim kaloriferom nakon dobave ventilatorom i dodatno u sušnici),
- s višestupanjskim zagrijavanjem zraka (\*kod osjetljivih materijala, gdje se tijekom procesa moraju izbjegavati povišene temperature uz postepeni porast sadržaja vlage zraka),
- s optokom ili recirkulacijom (\*kod osjetljivih materijala, a provodi se jednoličnom brzinom pri čemu se dio iskorištenog zraka ispušta u okoliš, a preostali dio ulazi ponovno u proces i miješa se sa svježim zrakom – reguliranje svojstva optočnog zraka troputnim ventilom. Smjesa svježeg i optočnog zraka se posredstvom ventilatora uvodi u zagrijač te nakon zagrijavanja u sušnicu),
- s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom (\*primjenjuje se u industriji radi sniženja potrošnje topline. U ovakvom procesu iskorišteni zrak koji izlazi iz sušnice usmjeruje se u izmjenjivač topline (regenerator ili rekuperator). Tu se toplina iskorištenog zraka predaje svježem zraku iz okoliša koji se predgrijava prije ulaza u kalorifer.),

- s kombinacijom optoka i regeneracije topline.

Do 15% energetske uštede u kontinuiranim tekstilnim sušarima se može postići ako se sadržaj vlage u tkanini smanji sa 60% na 50% mehaničkim postupcima prije nego što uđe u kontinuiranu sušaru (Europska komisija, 2003.).

### 3.1 Sušenje s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici

Shematski prikaz sušare s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici prikazan je na slici 17.



Slika 17. Shematski prikaz sušare s dogrijavanjem zraka (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Ventilatorom se dobavlja zrak, koji se dvokratno zagrijava, prvo u vanjskom zagrijaču (kaloriferu) do temperature, koja ovisi o svojstvima sušenog materijala, a zatim dodatno u sušnici. Ovakav proces prikazan je na slici 18. krajnjim točkama **1, A, 3**.

Toplina  $q_K$  odnosno  $q_V$  koja se dovodi u vanjskom zagrijaču (kaloriferu):

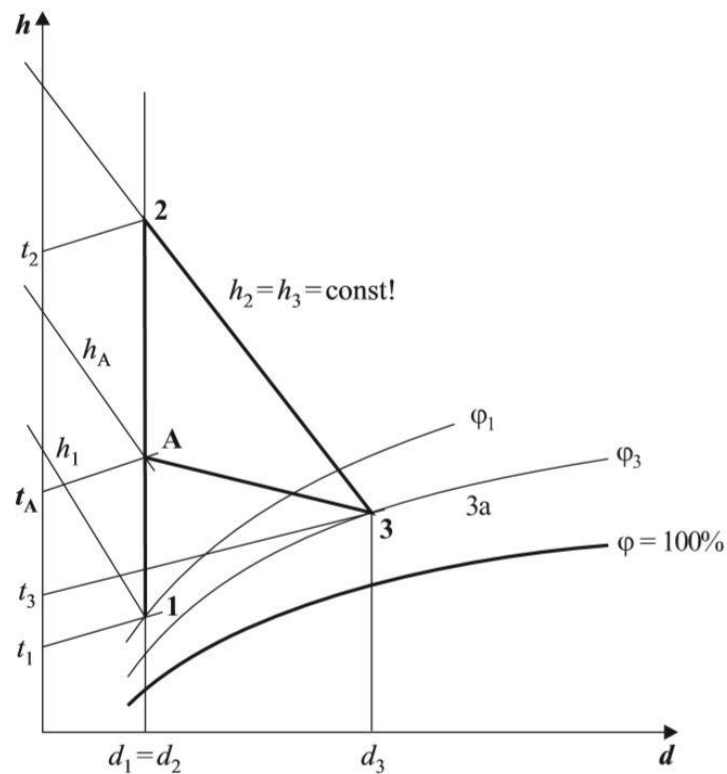
$$q_V = \frac{h_A - h_1}{d_3 - d_1}$$

Toplina  $q_D$  koja se dodatno dovodi u sušnici:

$$q_D = \frac{h_2 - h_A}{d_3 - d_1}$$

Na taj način moguće je sniženjem temperature zagrijavanja zraka ispred sušnice znatno smanjiti razliku temperatura  $t_2 - t_3$ , slika 18.

Bez dodatnog dovoda topline zrak bi se u kaloriferu zagrijavao do temperature  $t_2$ , proces **1, 2, 3**. Jednom te istom izlazu iz sušnice (**stanje 3**) odgovaraju sljedeće linije sušenja: **2–3** i **A–3** (Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

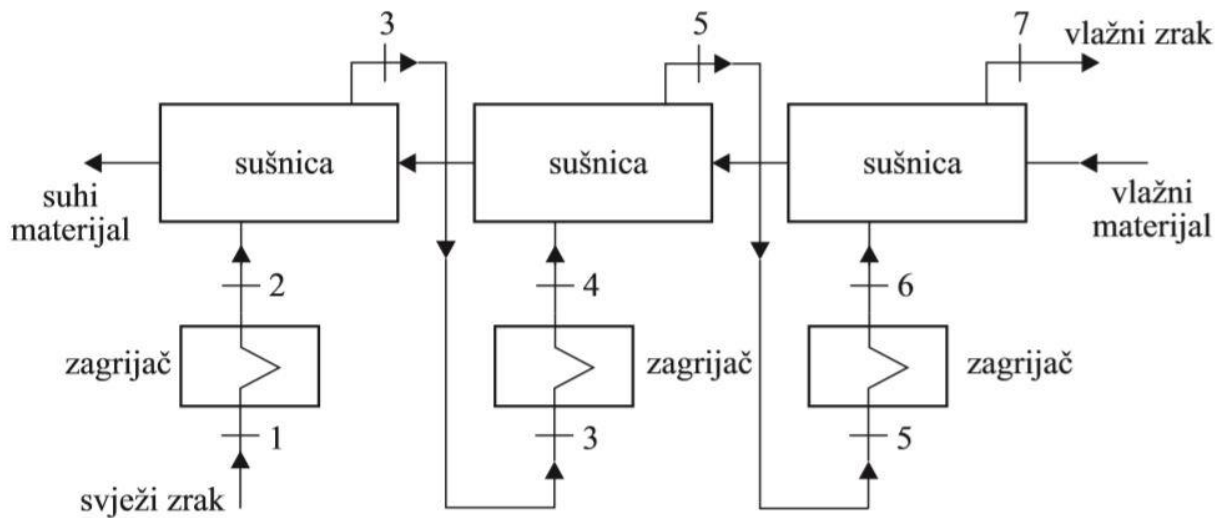


Slika 18. Proces sušenja s dogrijavanjem zraka prikazan u  $h, d$  dijagramu (IZVOR Budini i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Dakle, proces sušenja dogrijavanjem zraka dodatno zagrijava vlažan zrak iz sušare, koji se potom vraća u sušaru, kako bi unaprijedili sam proces sušenja i u prvom dijelu sušare izbjegli moguću pretvorbu pare u tekućinu.

### 3.2. Sušenje s višestupanjskim zagrijavanjem zraka

Kada se prilikom procesa sušenja mora voditi računa o izbjegavanju visokih temperatura, ponajviše se to odnosi na osjetljive materijale, tada se primjenjuje sušenje s višestupanjskim zagrijavanjem zraka prikazano shemom na slici 19 i njenim krajnjim točkama **1,2,3,4,5,6 i 7**.



Slika 19. Shematski prikaz sušare s višestupanjskim zagrijavanjem zraka (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Ventilatorom se pribavlja okolni zrak čije se zagrijavanje odvija u tri stupnja kako bi poboljšali uvjete sušenja, a to su redom: **1, 2; 3, 4 i 5, 6**.

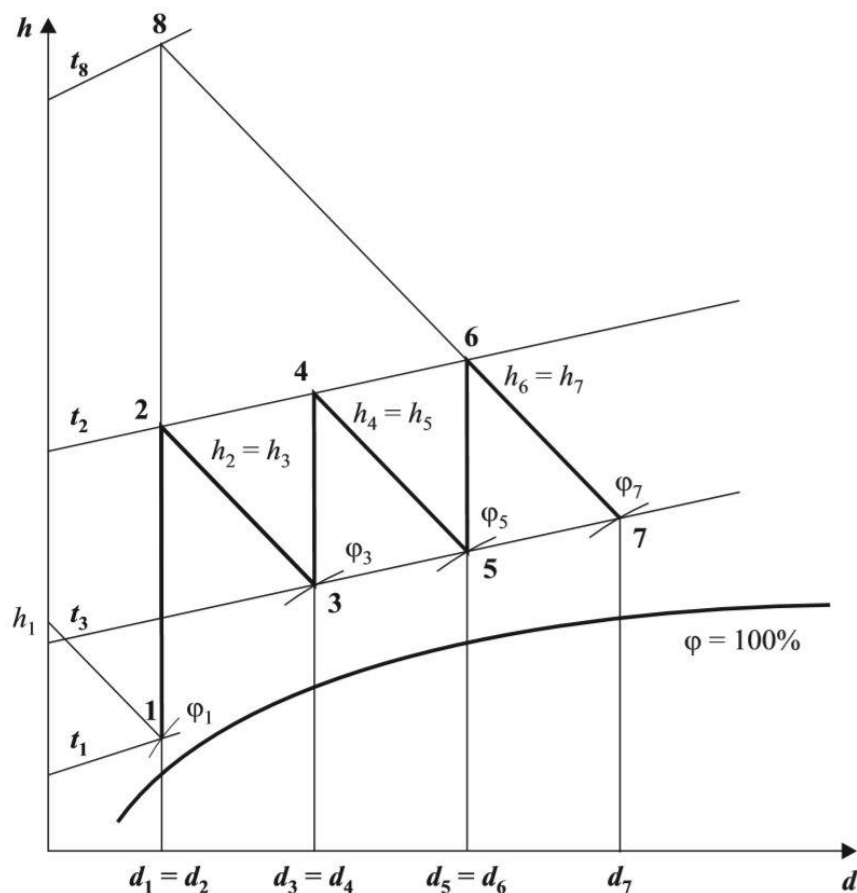
Usporedba jednostupanjskog i trostupanjskog procesa pri istom početnom **stanju 1** i konačnom **stanju 7**, gdje je  $t_7 = t_5 = t_3$  što možemo vidjeti u **h,d dijagramu**, slika 20. Za razliku od jednokratnog zagrijavanja pri višestupanjskim procesima temperatura zraka se snižava, istovremeno utrošak topline je niži.

Na dijagramu, slika 20, vidi se da se osnovni proces odvija do temperature numerirane **stanjem 8**. Ta temperatura značajno je viša od one pri višestupanjskom zagrijavanju  $t_8 \gg t_2$ .

Ovaj postupak se uspješno primjenjuje kod sušenja materijala gdje su potrebni ujednačeni uvjeti pri niskim temperaturama, zahvaljujući kontroliranom rastu količine vlage u zraku. Kontrola se postiže pravilnim



odabirom međustupanjskih temperatura zagrijavanja i stupnjeva zasićenja zraka sukladno brzinom isparavanja vlage iz materijala.



Slika 20. Proces sušenja s višestupanjskim zagrijavanjem zraka prikazan u  $h,d$  dijagramu (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Izraz za ukupnu specifičnu potrošnju topline u trostupanjskoj sušari, gdje veličine  $\varphi_1, \varphi_2$  i  $\varphi_3$  predstavljaju toplinu utrošenu u svakom pojedinom procesu:

$$\varphi_{vs} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \frac{h_6 - h_1}{d_7 - d_1}$$

Slijedom toga, očita je ovisnost utroška topline i zraka u sušari o početnim i konačnim varijablama stanja zraka, bez obzira na međustanja.

### 3.3. Sušenje s optokom ili recirkulacijom

Više od 50% sveukupne topline zraka za sušenje koji ulazi u sušnicu ispušta se kroz ispušni sustav u atmosferu. Prema podacima studije, čak 15% energije u procesu sušenja bi se moglo uštedjeti povratom topline zraka, koji se izbacuje u okolinu (Bontempi, 2004.).

Sušenje s optokom ili recirkulacijom se često primjenjuje pri sušenju osjetljivih materijala, a provodi se jednoličnom brzinom neovisno o vlažnosti i temperaturi zraka iz okoliša.

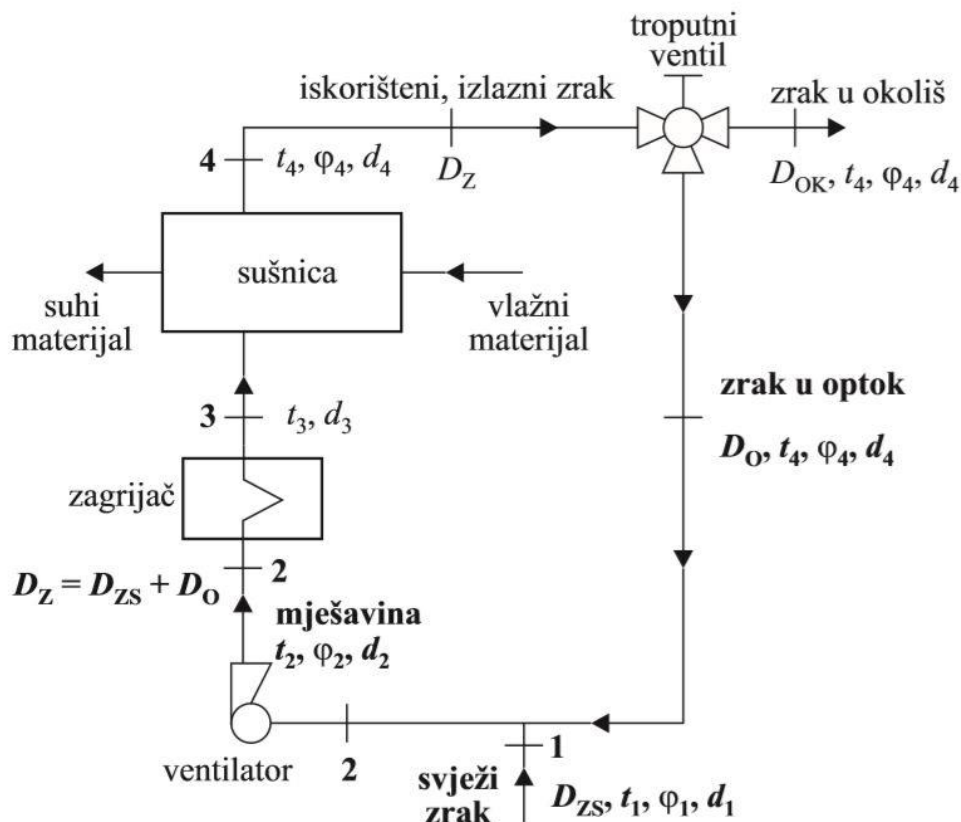
Recirkulacija svježeg zraka pruža sljedeće mogućnosti:

- sušenje materijala koji se mogu sušiti samo vlažnim zrakom,
- provedba procesa uz neznatne razlike temperature zraka na ulazu i izlazu,
- prolaz zraka kroz sušnicu većom brzinom i
- povišenje iskorištenja zraka u sušnici i sniženje potrošnje zraka

**Shematski prikaz** djelomične recirkulacije na slici 21 iz kojega je vidljivo da jedan dio iskorištenog zraka ulazi u optok:

$$D_o = D_z - D_{ok},$$

dok se ostatak ispušta u okolinu ( $D_{ok}$ ).



Slika 21. Shematski prikaz sušare s djelomičnim optokom zraka (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Kako bi osigurali jednoličnost svojstava optočnog zraka koristi se troputni ventil, iz razloga što se optočni zrak miješa sa svježim zrakom ( $D_{SZ}$ ) promjenjivog stanja. Istovremeno, masa svježeg zraka i masa ispuštenog zraka u okoliš su jednake:

$$D_{SZ} = D_{OK}.$$

Izraz  $D_Z = D_{SZ} + D_O$  predstavlja smjesu svježeg i optočnog zraka s protokom, koji se putem ventilatora uvodi u zagrijač, potom zagrijan odlazi u sušnicu.

*h, d dijagram* na slici 22 prikazuje proces recirkulacije s krajnjim točkama 1,2,3 i 4.

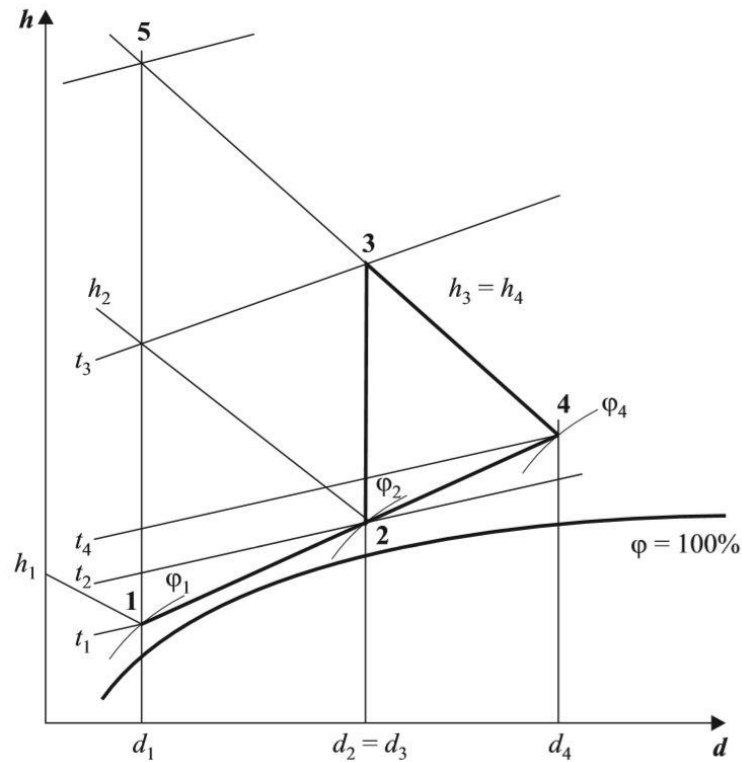
Svaka ta točka predstavlja određeno stanje zraka, a to su redom:

**Stanje 1** – svježi zrak; početno stanje

**Stanje 2**- smjesa svježeg zraka i optočnog zraka

**Stanje 3** – zagrijana smjesa zraka

**Stanje 4** – konačno stanje zraka; zrak na izlazu iz sušnice.



Slika 22. Proces sušenja s djelomičnim optokom zraka prikazan u  $h, d$  dijagramu (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Smjesa (stanje 2) svježeg zraka i dijela zraka na izlazu iz sušnice (4) zagrijava se (od 2 do 3) i uvodi se u sušnicu. Stanje smjese svježeg i optočnog zraka (2) nalazi se na pravcu miješanja 1,4.

Izraz za specifičnu potrošnju svježeg zraka u sušari je:

$$D_{ZS\ spec.} = \frac{1}{d_4 - d_1},$$

a masa recirkulirajućeg zraka dana je izrazom:

$$D_Z\ spec. = \frac{1}{d_4 - d_2}.$$

Svojstvo recirkulirajućeg procesa ( miješanje zraka iz okoliša s zrakom iz sušare; stanje 2) jest da toplina koja se dovodi u kalorifer (2-3) ovisna je samo o početnom stanju (1) i konačnom stanju (4) zraka bez obzira na međustanja. S obzirom na navedeno, empirijski izraz za dovedenu specifičnu toplinu u kaloriferu glasi:

$$q = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_2}.$$

Kao i kod prethodno opisanog procesa sušenja s višestupanjskim zagrijavanjem zraka, primjenom recirkulacije smanjit će se razlika temperature u sušnici ( $t_3 - t_4$ ).

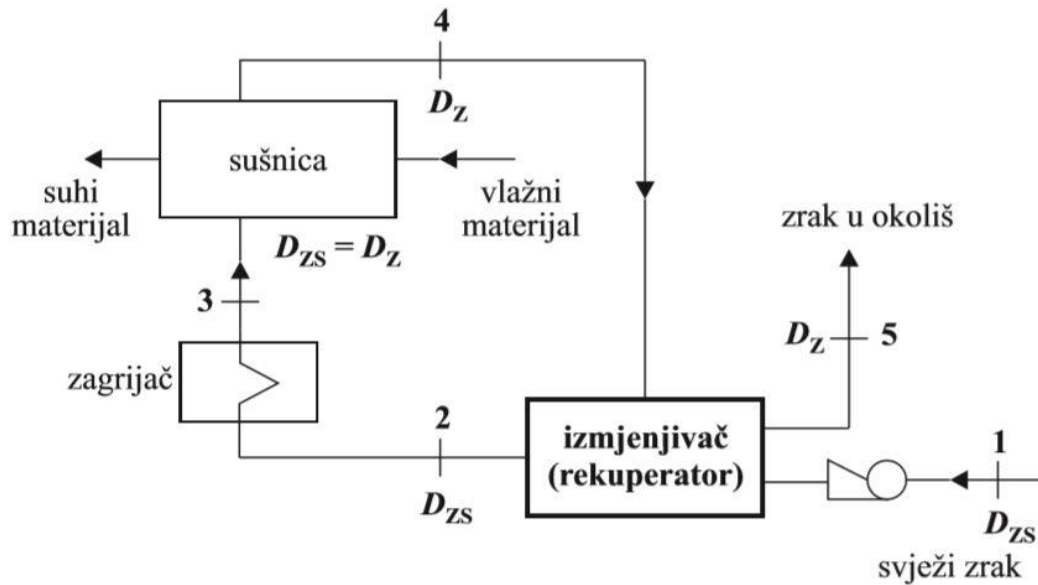
### **3.4. Sušenje s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom**

Jedna od metoda poboljšanja uvjeta procesa sušenja i bolje iskorištenje topline zraka obuhvaća proces sušenja s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom.

Ona se primjenjuje u industriji radi sniženja potrošnje topline.

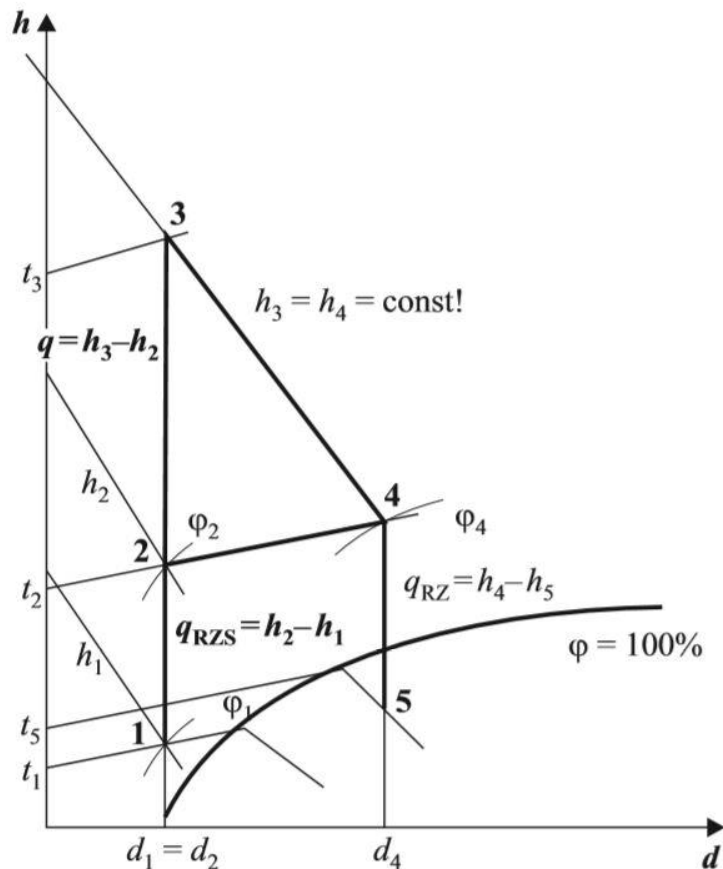
Kada bi otpadnu toplinu na izlazu iz sušare iskoristili za predgrijavanje ulaznog svježeg zraka, uspješno bi smanjili potrošnju topline koja se koristi u procesima sušenja (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

Shema sušare na slici 23 prikazuje da na izlazu iz sušnice ( $D_Z$ ), iskorišteni zrak se usmjeruje u rekuperator odnosno izmjenjivač topline. Toplinu iskorištenog zraka miješa se sa svježim zrakom iz okoliša  $D_{ZS}$ , te se prije ulaska u kalorifer svježi zrak iz okoline predgrijava.



Slika 23. Shematski prikaz sušare s regeneracijom topline (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Proces sušenja u  $h, d$  dijagramu na slici 24, prikazuje kako se svježi zrak (**1**), koji je primio dio topline od zraka na izlazu iz sušare (**4**), posredstvom ventilatora uvodi u rekuperator. Prema količini isparene vlage, protok zraka na izlazu je veći od onog na ulazu. Istovremeno, imajući u vidu gubitke u izmjenjivaču topline, pad temperature ( $t_4 - t_5$ ) mora biti manji od njezina povećanja ( $t_2 - t_1$ ). S obzirom na gubitke u izmjenjivaču topline, temperatura predgrijanog zraka na izlazu iz sušare (**4**) je viša od temperature zraka na ulazu (**2**). Kako bi se pojednostavio proračun, pretpostavlja se da je  $t_2 \approx t_4$ .



Slika 24. Proces sušenja s regeneracijom topline prikazan u  $h,d$  dijagramu (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Sam proces u  $h,d$  dijagramu je okružen krajnjim točkama **1-3-4**, te uz poznavanje stanja zraka **1,2,3 i 4** može se modelirati proces. Prema izotermi  $t_2 = t_4$ , na liniji **1 – 3** određuje se **stanje 2**.

S pretpostavkom da je masa zraka konstantna kroz čitav proces ( $D_{SZ} = D_Z$ ), te stupanj iskorištenja izmjenjivača topline  $\eta_R = 1$  iz balance izmjenjivača topline slijedi:

$$D_Z \cdot h_4 + D_{SZ} \cdot h_1 = D_Z \cdot h_5 + D_{SZ} \cdot h_2$$

$$D_{SZ}(h_1 - h_2) = D_Z(h_4 - h_5),$$

uz pretpostavku:

$$(D_{SZ} = D_Z) \text{ slijedi}$$

$$(h_2 - h_1) = (h_4 - h_5).$$

Toplina iskorištenog zraka iz sušare ( $Q_{RZ}$ ) dovodi se svježem zraku iz okoline ( $Q_{RZS}$ ), ujedno dovodenjem topline rekuperatoru ( $h_2 - h_1$ ) povećava se temperatura svježeg zraka ( $t_1 - t_2$ ).

Uz odvođenje topline ( $h_4 - h_5$ ) i sniženjem temperature ( $t_4 - t_5$ ) iskorištenom zraku iz sušare, te dolazi do promjene topline u procesu:

- Dovođenje jedinične topline  $Q_{RZS}$  ( $\text{kJ/kg}$ ) svježem zraku u rekuperatoru:

$$Q_{RZS} = \frac{Q_{RZS}}{D_{ZS}} = h_2 - h_1$$

- Jedinična toplina  $Q_{RZ}$  ( $\text{kJ/kg}$ ) odvedena zraku koji iz sušare ulazi u rekuperator predaje toplinu svježem zraku i odvodi je u okolinu:

$$Q_{RZ} = \frac{Q_{RZ}}{D_Z} = h_4 - h_5$$

- Kod ovog procesa jedinična potrošnja topline  $q$  ( $\text{kJ/kg}$ ) iznosi:

$$q = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_2}.$$

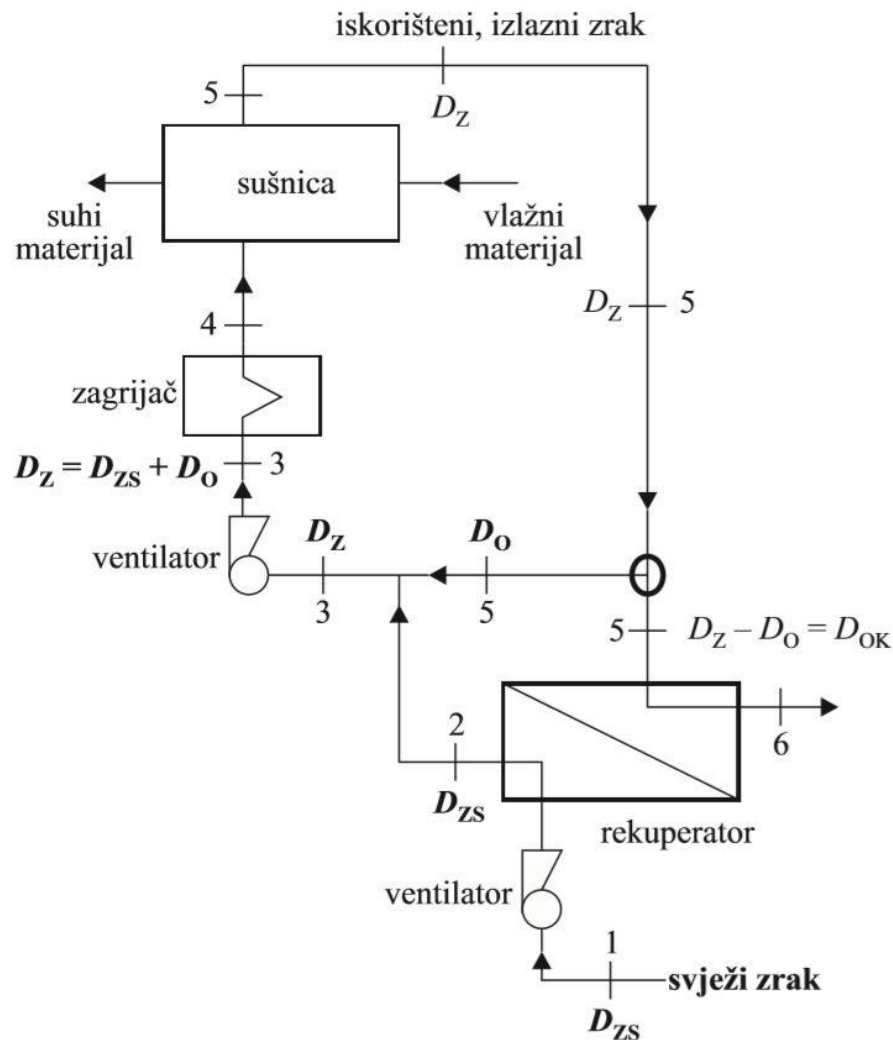
Ukoliko rekuperator ima bolju efikasnost rekuperacije tada će imati i veći stupanj iskoristivosti. Uglavnom su stupnjevi iskorištenja dani od strane proizvođača te se mogu kretati od 65% – 90%. Izmjenjivač topline se najčešće izrađuje od celuloze, polimera, aluminijski i slično. Kako bi dodatno smanjili toplinske gubitke, rekuperator može biti entalpijski odnosno u izmjenjivaču topline se dio vlage jedne struje zraka preko membrane izmjenjivača prenosi na drugu struju zraka (Stanić, 2018.).

### 3.5. Sušenje s kombinacijom optoka i regeneracije topline

Još jedan od procesa koji se koristi u postrojenjima za sušenje, a u svrhu veće učinkovitosti i poboljšanih rezultata uštede energije je sušenje s kombinacijom recirkulacije.



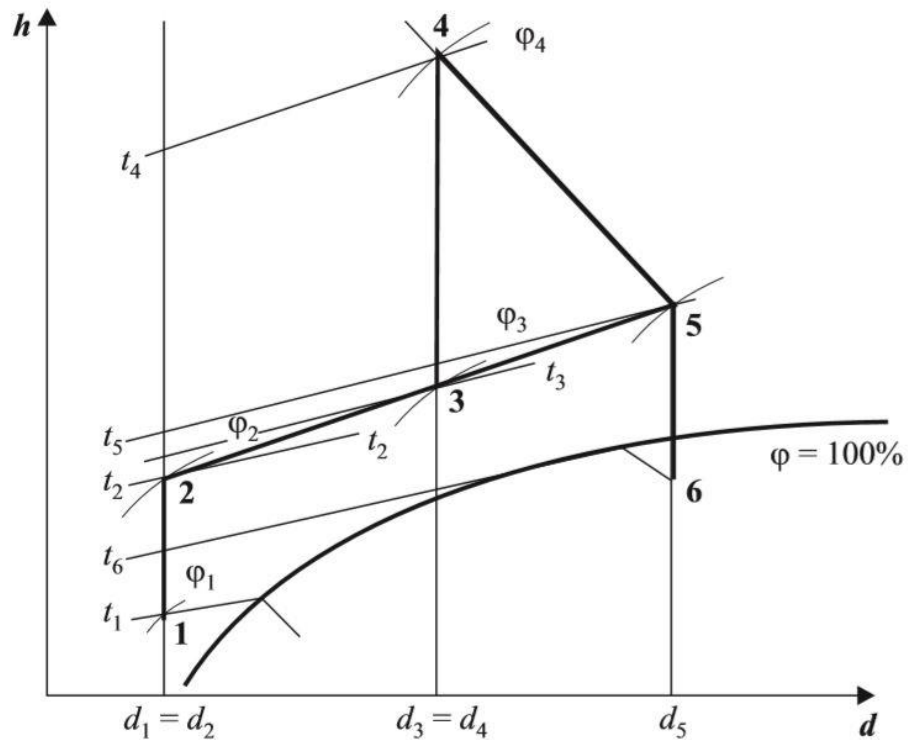
Kod ovog procesa svježi zrak  $D_{ZS}$  stanja okoliša (1) uvodi se u rekuperator pomoću ventilatora u kojem se zagrijava (1-2) uz nepromjenjivu količinu vlage ( $d_1 - d_2$ ), shematski prikaz slika 25.



Slika 25. Shematski prikaz kombinirane sušare s optokom i regeneracijom topline (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Istovremeno u rekuperator se dovodi jedan dio iskorištenog zraka ( $D_Z = D_O$ ) stanja 5 iz sušare, te se svježi zagrijava i hladi od stanja 5 do stanja 6, nakon čega se ispušta u okoliš. Kako bi se dobila smjesa mase zraka ( $D_Z$ ) stanja 3, potrebno je pomiješati zagrijava svježi zrak stanja 2, ( $D_{ZS}$ ) s optočnim zrakom stanja

5, ( $D_0$ ). Gdje se mješavina ( $D_Z$ ) dovodi u kalorifer pomoću ventilatora uz zagrijavanje do temperature  $t_4$ , konstantne vlage ( $d_3 = d_4$ ). Uz pretpostavku da su gubici zanemareni ( $\sum q = 0$ ) u sušaru se uvodi zagrijani zrak (stanje 4), gdje se odvija adijabatski proces sušenja od 4 do 5 ( $h_4 - h_5$ ), slika 26.



Slika 26. Proces kombiniranog sušenja s djelomičnim optokom zraka i regeneracijom topline prikazan u  $h,d$  dijagramu (IZVOR: Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.)

Kod kombiniranog procesa prikazanog u  $h,d$  dijagramu, u suglasju sa oznakama slijedi da je specifična potrošnja topline:

$$q = \frac{h_4 - h_3}{d_5 - d_3}$$

Važno je napomenuti da za kombinirani proces sušenja vrijede isti parametri kao i kod procesa s recirkulacijom zraka i regeneracijom topline (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.).

### 3.6. Sušare sa aspekta obnovljivih izvora energije i održivog razvoja

Tekstilna industrija, kao jedan od glavnih industrijskih sektora u svijetu, sa svim svojim sastavnicama, globalno se smatra jednom od najvećih zagađivača okoliša. Suvremeni se svijet već uvelike suočava s potrebom za globalnom, zajedničkom odgovornošću za razvoj u skladu s potrebama ljudi i prirode i razumijevanjem da planet Zemlja mora biti prihvatljiv i za sadašnje i za buduće generacije ljudi (Mikuš, 2019.). U tab. 4 prikazani su različiti utjecaji tekstilne industrije.

**Tab. 4.** Ekonomski, socijalni i ekološki utjecaji u polju tekstilne industrije (Mikuš, 2019; Pavunc et al., 2014.)

Ekonomski utjecaj	Socijalni utjecaj	Ekološki utjecaj
Globalno premještanje proizvodnje iz razvijenih industrijskih zemalja u zemlje u razvoju ili nerazvijene zemlje	Niske plaće radnika, niski standardi rada, ugovori o privremenom radu i dječji rad	Korištenje energije, vode i kemikalija
Pad izvoznih cijena tekstilnih i odjevnih proizvoda, brza moda	Spolna diskriminacija	Povećanje tekstilnog otpada
Prodor jeftinih proizvođača na međunarodno tržište	Izloženost zdravstvenim rizicima lokalnog stanovništva	Neobnovljive sirovine
Ukidanje sporazuma o tekstilu i odjeći	Nedostatak pravedne trgovine subvencije i propisi sprječavaju pravednu trgovinu tekstila	Doprinos klimatskim promjenama

Procjenjuje se da se od ukupne energije koju koristi industrijski sektor, čak 12% potrošnje otpada na procese sušenja. Proces sušenja može imati negativan utjecaj na životnu sredinu u vidu zagađenja atmosfere zbog oslobađanja štetnih agensa sušenja i emisija  $CO_2$  i velike potrošnje energije. Cilj:

Smanjenje ovog udjela doprinosi i smanjenju emisije  $CO_2$ , što je moguće unapređenjem starih postojećih tehnologija sušenja i usvajanjem i uvođenjem novih. Jedan od načina smanjenja nastanka štetnih emisija koje onečišćuju okoliš te ostvarenja energetske uštede jest ponovna upotreba otpadnog zraka iz procesa sušenja u najčešće korištenim konvencionalnim sušilicama. Ovaj je postupak pokazao značajan stupanj očuvanja fosilnih goriva, što se pokazalo potencijalno ostvarivim rekuperacijskim ili recirkulacijskim procesom sušenja zraka (Budin i Mihelić – Bogdanić, 1994.). S obzirom na to da je u procesu potrebna neprekidna cirkulacija svježeg, suhog i vrućeg zraka, otpadni zrak koji je uglavnom vlažan i onečišćen raznim partikulama tvari, šalje se u izmjenjivač topline gdje se ostvaruje prijenos topline između svježeg i otpadnog zraka. Jedan dio otpadnog zraka zagrijava sustav, a drugi dio ohlađenog otpadnog zraka odlazi u okolinu (Ogulata, 2004.).

Potencijalna unaprjeđenja:

- Uporaba filtera zraka,
- Izgradnja postrojenja za visoko-temperaturno sušenje uporabom solarne energije i postrojenja za sušenje s obnovljivim izvorima energije.

Optimiziranjem sustava za zagrijavanje i redovitim održavanjem plamenika u kontinuiranoj sušari sa direktnim plinskim sustavom za zagrijavanje pridonosi smanjenju emisije metana, što utječe na stvarni kapacitet plamenika (Europska komisija, 2003). U današnje vrijeme, potrošnja energije predstavlja veliki problem na globalnoj razini. U tekstilnoj industriji procesi koji se odvijaju su vrlo intenzivni i zahtijevaju veliku količinu goriva i električne energije (Ozturk, 2005.). Zbog toga je važno obratiti pažnju na njeno smanjenje te potrebno je voditi brigu o obnovljivim izvorima energije i primijeniti karakteristična rješenja s obzirom na metode dovođenja topline. Naime, Budin i Mihelić – Bogdanić (1994.) ispitivale su utjecaj procesa sušenja korištenjem solarne energije temeljene na solarnim podacima u RH u odnosu na sušenje fosilnim gorivom, te ovisno o klimatskim uvjetima u toku godine energetske uštede fosilnih goriva, primjenom solarne energije se kreću od 14,6 – 20%.

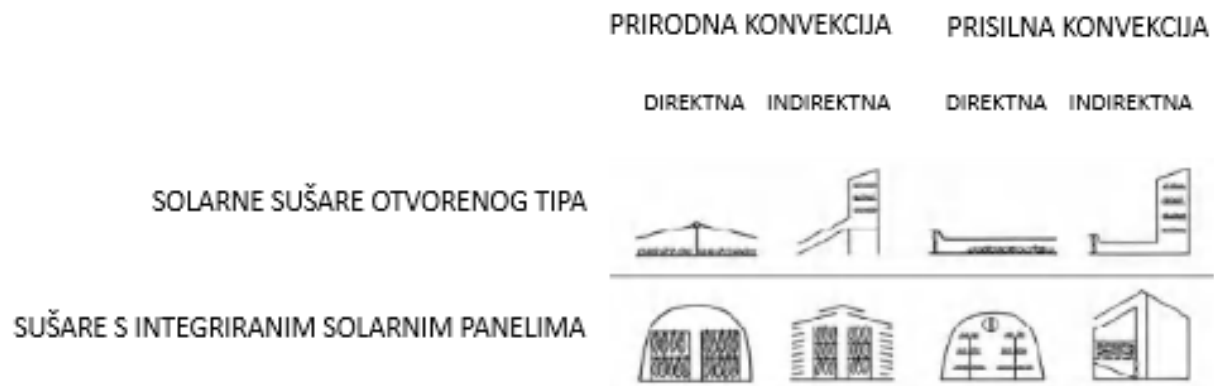
Korištenje sunčeve energije za tehnološke procese u industriji, u ovom slučaju kod procesa sušenja ne odnosi se na prirodne procese sušenja sunčevim zračenjem već na sušenje podvrgnuto djelovanjem elektromagnetskog polja sunca. Takva vrsta tehničkog dizajna sušare koristi sunčevu energiju za postizanje adekvatnih i učinkovitih uvjeta za sušenje, a u slučaju da se ti uvjeti ne mogu ispuniti djelovanjem energije Sunca razvijen je koncept solarnih sušara s različitim dodatnim izvorima energije kako bi im bio omogućen kontinuirani rad (Tsotsas i Mujumdar, 2012.; Nedić et.al. 2019.).

Topić i suradnici navode kako moderne tehnologije na principu solarne energije konkuriraju sušarama s visokim temperaturama i sušarama s neprekidnim protokom (Topić et.al., 2017a.), jer napretkom tehnologije takve sušare imaju mogućnost zagrijavanja radnih tekućina ili plinova na visoke temperature (Tsotsas i Mujumdar, 2012.).

Prednosti solarne sušare:

- Ušteda energije,
- Neizravna metoda sušenja,
- Velika potražnja za čistim tehnologijama,
- Konkurentnost proizvoda u odnosu na proizvod dobiven klasičnim sušenjem.

Na slici 27 prikazana je klasifikacija solarnih sušara prema načinu kretanja zraka, izlaganja elektromagnetskom zračenju sunca i strukturi sušare (Tsotsas i Mujumdar, 2012.).



Slika 27: Klastifikacija solarnih sušara (IZVOR: Tsotsas i Mujumdar, 2012.)

Uporaba sušara na bazi solarne energije omogućuje bolju kvalitetu sušenih proizvoda, a istovremeno se ostvaruju značajne energetske uštede. Od velike je važnosti kontinuirano poboljšavati dizajnu i razvoj solarnih sušara zbog ekonomskih i ekoloških razloga (Topić et.al., 2017a.).

Vrste solarnih sušara (Topić et.al., 2017a.):

- Solarne pokretne sušare,
- Solarna sušara s izdvajanjem vlage,
- Solarna s apsorpcijskom jedinicom,
- Solarna sušara s toplinskom pumpom i spremnikom topline,
- Solarna sušara s integriranim solarnim prijernikom integrirana u širi tehnološki energetska proces,
- Solarna sušara s odvojenim solarnim prijernikom i toplinskom pumpom,
- Solarna sušara s toplinskom pumpom i višenamjenskim solarnim prijernikom,
- Standardni tip solarne sušare s apsorpcijskom, kemijskom, toplinskom pumpom,
- Solarna sušara s kemijskom toplinskom pumpom i solarnim prijernikom sa tekućim fluidom,

- Kombinirana solarna sušara s solarnim prijemnikom za toplinsku i električnu energiju.

Također, u svrhu doprinosa zaštite okoliša, energetske učinkovitosti i održivog razvoja razvijeno je postrojenje za visoko-temperaturno sušenje s obnovljivim izvorima energije s ciljem minimalne upotrebe fosilnih goriva. Uporaba biomase kao biorazgradivog dijela biološkog, industrijskog, komunalnog otpada omogućuje istodobno recikliranje otpada s ciljem proizvodnje potrebne energije u procesu sušenja, a uspješnost termičke obrade sušenja biomasom ovisi o samom pristupu - ona će biti efikasnija ukoliko pristup bude pažljiviji.

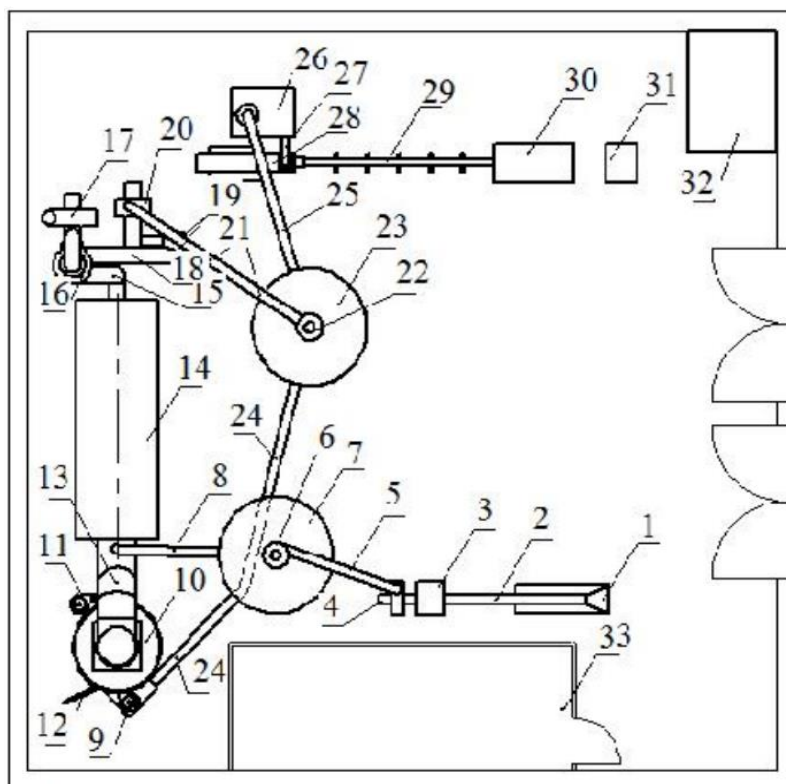
Razlikuju se tri tipa biomase u svrhu dobivanja energije iz (Freire et.al., 2019.; Topić et.al., 2017b.):

- Šumski ostaci i otpaci,
- Poljoprivredni ostaci,
- Biomasa iz komunalnog otpada.

Veliki dio drvene biomase mora proći procese sušenja, jer vlaga uvelike utječe na njenu energetska vrijednost. Topić i suradnici u svom radu dali su prikaz postrojenja za visoko-temperaturno sušenje drvnog otpada s velikim postotkom relativne vlažnosti (50 – 80%), prikazan na slici 28. Kao gorivo se koristi drveni otpad sa udjelom relativne vlage manjom od 15% u svrhu dobivanja prešane usitnjene drvene sirovine za izradu briketa i peleta za potrebe grijanja i termoenergetskih postrojenja (Topić et.al., 2017a.).

Osnovni elementi sustava za visoko-temperaturno sušenje (Topić et.al., 2017a.):

- izvor topline, koji se sastoji od uređaja za sagorijevanje suhe drvene sirovine;
- visoko-temperaturna pneumatska sušnica sa troprolaznim bubnjem, koja služi kao komora za sušenje (sadržaj vlage mora biti konstantan tokom cijelog procesa sušenja),
- sustav za uvođenje vlažnog materijala u komoru za sušenje i
- sustav za transport materijala kroz komoru za sušenje i sistem za odvajanje osušenog materijala.



Slika 28: Shematski prikaz postrojenja za visoko-temperaturno sušenje drvnog ostatka odnosno piljevine u svrhu dobivanja briketa (IZVOR: Topić et.al., 2017a.)

Na ulazu se nalazi donji spremnik za vlažni materijal (1) koji odlazi mehaničkim transporterom (2) u drobilicu drvnog otpada (3). Također u postrojenju se nalazi ventilacijski sustav za pneumatski transport mokrog materijala odnosno piljevine (4), sustav za pneumatski transport mokrog materijala (5) zatim vlažan materijal prolazi kroz struju zraka (6) i odlazi u spremnik (7). Mehanički transportni mehanizam (8) povlači vlažan materijal iz spremnika (7) te ga uvodi u visoko-temperaturnu sušaru s tropropusnom komorom za sušenje (14), koju kanal za uvođenje agensa sušenja (13) snabdijeva mješavinom produkata sagorijevanja i okolnog zraka iz uređaja za sagorijevanje (10). Uređaj za sagorijevanje (10) sastoji se od ventilatora sa sustavom za dovođenje goriva i primarnog zraka u komoru za izgaranje (9), ventilatora za uvođenje sekundarnog zraka u komoru za izgaranje (11) i plinskog plamenika (12). Visoko-temperaturna sušara povezana je sustavom za pneumatski transport osušenog materijala (15), zračnim sustavom (16) i glavnim ventilatorom za cirkulaciju zraka (17). Potom se materijal transportira mehanički (18) do mlina za



sušeni materijal (19), (20) prikazuje ventilator za transport usitnjenog osušenog materijala u spremnik te kanal (21) kojim se transportira osušeni materijal (22) u spremnik (23). (24) predstavlja transporter za dovođenje osušenog materijala do ventilator do ventilatora za uvođenje osušenog usitnjenog materijala u komoru uređaja za sagorjevanije, (25) mehanički prijenosnik s separatorom, (26) spremnik, (27) pužni separator, (28) preša za briketiranje, (29) sustav za hlađenje briketa, (30) pakiranje, (31) vaga, (32) skladištenje proizvoda, (32) kontrolna soba.

### **3.7. Sustavi zagrijavanja zraka u kontinuiranim sušarama**

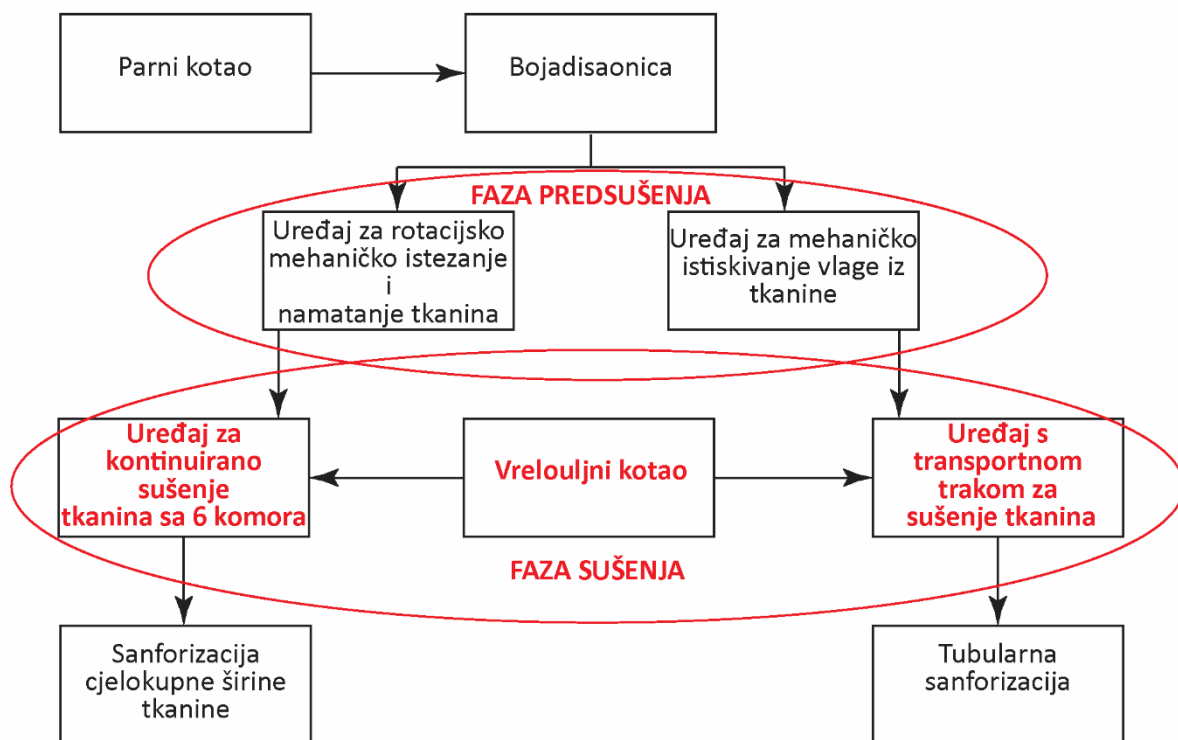
Postoje dva osnovna sustava zagrijavanja zraka kojim se suše tekstilne tkanine u kontinuiranim modularnim sušarama. Prvi je sustav indirektnog zagrijavanja koji u svojoj izvedbi uključuje kotao za vrenje vode ili vrelouljni kotao za zagrijavanje ulja. I razvijena para i zagrijano ulje služe kao prenosioci topline kroz sustav i svoju toplinu prenose na zrak za sušenje tekstilnog materijala na način da prolaze kroz sustav cjevovoda (toplovodi). Sustav direktnog zagrijavanja zraka pretpostavlja kako je svaka komora (jedinica kontinuirane sušare) opremljena plamenikom za direktno izgaranje plinskog goriva, a sama mreža distribucijskih cjevovoda za prijenos dimnih plinova, koji služe kao prenosioci toplinske energije, se nalazi unutar same komore. Prednosti direktnog sustava zagrijavanja uključuju manje instalacijske troškove i smanjenju količinu prostora za postavljanje samog sustava sušare. Također je omogućeno pravilnije upuhivanje zraka kroz mlaznice na površinu tkanine namijenjene za sušenje. Prednosti indirektnog sustava zagrijavanja pomoću vrelouljnog kotla i toplovoda uključuju smanjenje operativne troškove, troškove održavanja i fleksibilnost u upravljanju. Najveći nedostatak je nepotpuno izgaranje goriva. Također valja napomenuti da kontinuirane sušare s indirektnim zagrijavanjem pružaju mogućnost kontinuiranog rada s većim rasponom proizvodnih parametara i veće proizvodne kapacitete, koja nije omogućena sustavom direktnog zagrijavanja. Veliki nedostatak sustava s direktnim zagrijavanjem je nemogućnost mijenjanja parametara sušenja, a najveća prednost je veća energetska efikasnost ([www.pirobloc.com](http://www.pirobloc.com)). Sustavi

indirektnog zagrijavanja u kontinuiranim sušarama koji su opremljeni klasičnim kotlovima za vrenje vode i distribuciju pare toplovodima kroz sustav komora, su ograničeni operativnim temperaturama sušenja do maksimalno 160°C i stoga nisu prikladni za istovremeno termofiksiranje ili postizanje dimenzijske stabilnosti tkanina posredstvom topline (Purushothama, 2018.).

#### 4. Rezultati

##### 4.1. Proračun energetske uštede u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka

Proračun energetske uštede bit će prikazan na primjeru završne faze dorade u procesu mokre obrade tkanina, odnosno bojadisanja tekstilnih tkanina s posebnim osvrtom na proces sušenja u kontinuiranoj sušari sa sustavom za zagrijavanje cirkulacijom fluida (indirektno zagrijavanje), slika 29.



Slika 29. Shematski prikaz procesa bojadisanja tkanina

Proces započinje bojadisanjem tkanine, koja se potom uvodi u uređaje za mehaničko uklanjanje vlage. U fazi predušenja, vlaga iz materijala se uklanja mehaničkim postupcima. Vlaga se uklanja prvo u uređaju za rotacijsko mehaničko istezanje i namatanje tkanina (eng. *tube slitting machine*) i potom uređaju za mehaničko istiskivanje vlage iz tkanine prolaskom kroz valjke (eng. *ballon squeezing machine*) Mehaničkim istiskivanjem slobodne vlage pomoću valjaka za istiskivanje se udio vlage smanjuje sa 150% na 65-75%, ovisno o sirovinskom sastavu tkanine. Energija potrebna za mehaničko uklanjanje vlage istiskivanjem iz tkanine je  $50 J/kg_{vlage}$ . Vakuumskim istiskivanjem vlage iz materijala, udio vlage se smanjuje sa 150% na 60-36%. Energija potrebna za vakuumsko uklanjanje vlage iz tkanine je  $75 J/kg_{vlage}$  (Brookstein, 1979.). Po završetku faze predušenja, vlažna tkanina sa smanjenim udjelom vlage ulazi u uređaj za kontinuirano sušenje tkanina i uređaj s transportnom trakom i upuhivanjem vrućeg zraka (eng. *conveyor belt drying machine*), slika 30. Energetski proračuni odnose se na proces sušenja u kontinuiranoj sušari, odnosno uređaju za kontinuirano sušenje (eng. *stenter drying machine*) kao na sl. x (Cay et al., 2007.). Kontinuirana sušara ima šest povezanih modularnih komora, svaka s četiri ventilatora za cirkulaciju vrućeg zraka. Zrak se zagrijava pomoću vrućeg ulja koji izlazi iz kotla i služi kao prenosilac topline. U ovoj izvedbi kotao izgaranjem goriva ne zagrijava vodu te ju pretvara u vrelu paru, već zagrijava ulje koje potom svoju toplinu predaje zraku za sušenje, a cirkulira kroz sustav kontinuirane sušare pomoću pumpi. U vrelouljnim kotlovima (eng. *hot oil boiler, thermic fluid heaters, shell boilers*) cirkulira specijalno termičko ulje kao nositelj topline i sustav može raditi uz niske radne tlakove do 6 bara uz postizanje visokih temperatura do 300°C, što nije moguće postići ukoliko je nosilac topline voda, odnosno para, jer bi sustav pri temperaturi od 300°C zahtijevao postizanje visokog radnog tlaka od 85 bara (Desai, 2015.). Stoga je postizanje visokih temperatura pri relativno niskim radnim tlakovima najveća prednost vrelouljnih kotlova i stoga su pogodni za primjenu u industrijskim procesima. Zrak za sušenje tkanina i dimni plinovi se izbacuju dalje u atmosferu. Termička ulja imaju slijedeće prednosti (Dryden, 1982.; Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry, 2007.; Abbi i Jain, 2006.):

- točka vrelišta kod atmosferskog tlaka omogućuje postizanje visokih radnih temperatura (do 300°C),
- niska temperatura smrzavanja termičkog ulja omogućava nesmetani pogon pri niskim temperaturama pa kod eventualnog zamrzavanja ulja ne može doći do pucanja i oštećenja dijelova instalacije
- niska viskoznost takvih mineralnih ulja omogućuje uporabu u vrlo širokom području temperatura i radi toga se mogu koristiti kako za grijanje, tako i za hlađenje u tehničkim procesima (naročito pogodno u procesima, gdje se istim medijem može vršiti grijanje i hlađenje),
- kemijska stabilnost pri visokim temperaturama,
- jeftino održavanje (ne ostavljaju naslage ili talog u sustavu pa nije potrebno čišćenje sustava i ne uzrokuju koroziju materijala pa nije potrebna dodatna zaštita od korozije),
- nije potrebna priprema pojne vode u sustavu, precizna i jednostavna regulacije temperature,
- mogućnost da se istim medijem na različitim mjestima u sustavu, postižu različite radne temperature,
- instalacije s termičkim uljem rade pri niskim radnim tlakovima,
- isključena mogućnost eksplozije,
- instalacije s termičkim uljem su investicijski povoljnije i jednostavnije od odgovarajućih instalacija s vodom i parom, i
- tihi rad.

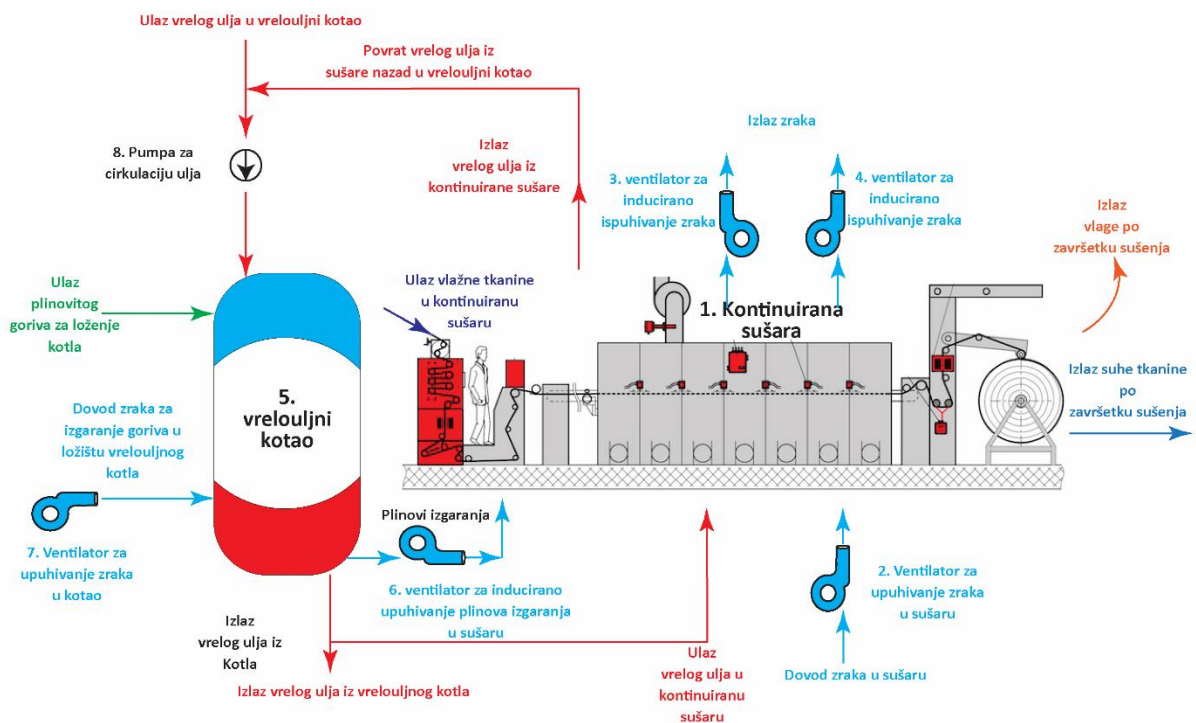


Slika 30. Primjer kontinuirane sušare tkanina (IZVOR: <https://www.lucyengineering.com/stenter-machine.html>)

Završetkom faze sušenja primjenom toplinske energije, nastupa faza završne obrade tkanina procesom sanforizacije (Cay et al., 2007.). Sanforizacija je američki patentirani postupak prisilnog skupljanja (engl. *compressive shrinkage*) i fiksiranja tkanine u skupljenom stanju, tako da se pri naknadnom kvašenju ne skuplja više od 0,75 - 1% (Tehnička enciklopedija, Svezak 1, 1963.). Kao što je prije spomenuto, čak 50% od ukupne energetske potrošnje proizvodnog procesa troši se u procesu sušenja pri proizvodnji gotovih tekstilnih proizvoda, od čega čak 25% za rad kontinuirane sušare (Brookstein, 1979.; Cay et al., 2007.).

Plinovito gorivo ulazi u kotao pri temperaturi  $t_{gor1} = 240^{\circ}\text{C}$  i tlaku od  $p_{gor} = 324 \text{ kPa}$  uz entalpiju od  $h_{gor} = 528 \text{ kJ/kg}$ . Drugi dio goriva koji ulazi u kotao se vraća iz proizvodnog procesa uz temperaturu  $t_{gor2} = 200^{\circ}\text{C}$ . Temperatura tkanine pri ulazu u kontinuiranu sušaru iznosi  $t_{tk_{ulaz}} = 30^{\circ}\text{C}$  i tlaku od  $p_{gor} = 101,33 \text{ kPa}$ , a na izlazu iz sušare  $t_{tk_{izlaz}} = 65^{\circ}\text{C}$  i tlaku od  $p_{gor} = 101,33 \text{ kPa}$ . Temperatura dimnih plinova na izlazu iz kotla, iznosi  $t_{dp} = 428^{\circ}\text{C}$ . Temperatura vlažnog zraka na izlazu iz sušare iznosi  $t_{vz} = 115^{\circ}\text{C}$ . Temperatura vrelog ulja na izlazu iz kotla (prenosilac topline), tj. na ulazu u kontinuiranu sušaru iznosi  $t_{ulja} = 240^{\circ}\text{C}$ .

U kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka i stupnjem iskorištenja kapaciteta  $\beta = 50,4\%$  suši se  $300 \text{ kg/h}$  materijala početne vlažnosti  $65\%$  do konačne vlažnosti od  $8\%$  (slika 31). Okolni zrak na ulazu u zagrijač (kalorifer) ima  $t_{z1} = 25^\circ\text{C}$ , relativnu vlažnost  $60\%$  i sadržaj vlage  $d_1 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$ , a zagrijavanje protječe do  $160^\circ\text{C}$ . Temperatura vlažnog zraka na izlazu iz sušnice je  $100^\circ\text{C}$ . Toplinska energija za zagrijavanje dobiva se izgaranjem plinovitog goriva koji ima nižu toplinsku vrijednost  $H_n = 35649 \text{ kJ/m}^3$ , a stupanj iskorištenja izgaranja je  $\eta_i = 87\%$ . Kao prenosilac topline upotrebljava se ulje, a stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak je  $\eta_p = 80\%$ . U ovom će radu biti prikazana izračun godišnje potrošnje goriva ( $\text{m}^3$ ,  $\text{tEU}$ ) i usporedba uštede za sljedeće procese: 1. jednostavni, 2. recirkulativni ili optočni, 3. regenerativni, 4. kombinirani.



Slika 31. Shematski prikaz kontinuirane sušare s šest modularnih komora i indirektnim zagrijavanjem zraka sustavom vrelouljnog kotla i toplovoda

Osnovni pojmovi:

$D_{H_2O}$  (kg/h) je masa vlage uklonjene iz materijala prilikom sušenja,

$V_g$  ( $m^3/h$ ) volumen goriva koje se troši prilikom procesa sušenja,

$V_{gg}$  (kg/h) volumen goriva koje se troši prilikom procesa sušenja godišnje,

$D_z$  (kg/h) masa apsolutno suhog zraka koji prolazi kroz sušnicu

$D_{sz}$  (kg/h) masa svježeg zraka koji prolazi kroz sušnicu uz optok

$D_{Mvu}$  (kg/h) je masa vlažnog materijala na ulazu u sušnicu,  $D_{Mvu} = 300$  kg/h

$d_3$  (kg/kg<sub>suhog zraka</sub>) je sadržaj vlage zraka na izlazu iz sušnice,  $d_3 = 0,03$  kg<sub>vlage</sub>/kg<sub>suhog zraka</sub>

$d_2$  (kg/kg<sub>suhog zraka</sub>) je sadržaj vlage zraka na ulazu u sušnicu, tj. izlazu iz zagrijača,  $d_1 = d_2 = 0,008$  kg<sub>vlage</sub>/kg<sub>suhog zraka</sub>

$d_1$  (kg/kg<sub>suhog zraka</sub>) je sadržaj vlage zraka na ulazu u zagrijač,  $d_1 = d_2 = 0,008$  kg<sub>vlage</sub>/kg<sub>suhog zraka</sub>

$t_{z3}$  (°C) je temperatura zraka na izlazu iz sušnice,  $t_{z3} = 100$ °C

$t_{z2}$  (°C) je temperatura zraka na ulazu u sušnicu, tj. izlazu iz zagrijača,  $t_{z2} = 160$ °C

$t_{z1}$  (°C) je temperatura zraka na ulazu u zagrijač,  $t_{z1} = 25$ °C

$x_u$  (%) je vlažnost materijala na ulazu u sušnicu,  $x_u = 65$ %

$x_i$  (%) je vlažnost materijala na izlazu iz sušnice,  $x_i = 8$ %

Izračun mase vlage koju treba ukloniti iz materijala prilikom sušenja

$$D_{H_2O} = D_{Mvu} \cdot \left( \frac{x_u - x_i}{100 - x_i} \right) = 300 \cdot \left( \frac{65 - 8}{100 - 8} \right) = 185,9 \text{ kg/h}$$

Entalpije se izračunavaju putem izraza

$$h_1 = t_{z1} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z1}) \cdot d_1 = 25 + (2500 + 1,96 \cdot 25) \cdot 0,008 = 45,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,008 = 182,5 \text{ kJ/kg}$$

Izračun mase zraka potrebne prilikom sušenja

$$D_z = \frac{D_{H_2O}}{d_3 - d_2} = \frac{185,9}{0,03 - 0,008} = 8450 \text{ kg/h}$$

#### 4.1.1. Energetski proračun u jednostavnom procesu sušenja

Potrošnja jedinične topline:

$$q_t = \frac{h_2 - h_1}{d_3 - d_2} = \frac{182,5 - 45,4}{0,03 - 0,008} = 6231,8 \text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_t = 185,9 \cdot 6231,8 = 1\,158\,491,6 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_p = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_p} = \frac{1\,158\,491,6}{0,87 \cdot 0,8} = 1\,664\,499,4 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{1\,664\,499,4}{35649} = 46,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 46,7 \cdot 1471,7 = 68\,728,4 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnje topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 1\,664\,499,4 \cdot 1471,7 = 2,45 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnje topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{2,45 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 83,6 \text{ tEU}$$



**4.1.2. Proračun energetskih ušteda u procesu sušenja s optokom ili recirkulacijom (recirkulativni, tj. optočni proces uz optok  $Y_O = 53\%$ )**

Masa svježeg zraka koja cirkulira prilikom sušenja

$$D_{zS} = D_z \cdot (1 - Y_O) = 8450 \cdot (1 - 0,53) = 3971,5 \text{ kg/h}$$

Sadržaj vlage u stanju 4 na izlazu iz sušnice

$$d_4 = \frac{D_{H_2O}}{D_{zS}} + d_1 = \frac{185,9}{3971,5} + 0,008 = 0,055 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zrak}}$$

Sadržaj vlage u točki miješanja (stanje 2)

$$d_2 = d_4 - \frac{D_{H_2O}}{D_z} = 0,055 - \frac{185,9}{8450} = 0,033 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zrak}}$$

Entalpija u stanju 4 ako je  $h_4 = h_3$  uz  $d_2 = d_3 = 0,033 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zrak}}$

$$h_4 = h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,033 = 252,85 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura u točki miješanja (stanje 2)

$$t_{z2} = (1 - Y_O) \cdot t_1 + Y_O \cdot t_4 = (1 - 0,53) \cdot 25 + 0,53 \cdot 100 = 64,75^\circ\text{C}$$

Entalpija u stanju 2

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 = 64,75 + (2500 + 1,96 \cdot 64,75) \cdot 0,033 = 151,44 \text{ kJ/kg}$$

Specifična potrošnje topline

$$q_t = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_3} = \frac{252,85 - 151,44}{0,055 - 0,033} = 4609,55 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{H_2O} \cdot q_t = 185,9 \cdot 4609,55 = 856 \ 915,35 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_P = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_P} = \frac{856 \ 915,35}{0,87 \cdot 0,8} = 1 \ 231 \ 200,2 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{1\,231\,200,2}{35649} = 34,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 34,5 \cdot 1471,7 = 50\,773,65 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 1\,231\,200,2 \cdot 1471,7 = 1,81 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,81 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 61,84 \text{ tEU}$$

#### 4.1.3. Proračun energetskih ušteda u procesu sušenja s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom uz $\eta_R = 58\%$

vrijedi jednakost  $d_1 = d_2 = d_3 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$

vrijedi jednakost  $d_4 = d_5 = 0,03 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$  (očitano iz dijagrama pri  $t_{z4} = 100^\circ\text{C}$  i  $h_4 = h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,008 = 182,5 \text{ kJ/kg}$ )

Entalpija na izlazu iz izmjenjivača  $h_{2a}$  uz jednakost  $d_1 = d_2 = d_{2a} = d_3 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$ )

$$h_{2a} = t_{z2a} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2a}) \cdot d_{2a} = 100 + (2500 + 1,96 \cdot 100) \cdot 0,008 = 118,4 \text{ kJ/kg}$$

i entalpija  $h_2$  u točki 2

$$h_2 = \eta_R \cdot (h_{2a} - h_1) + h_1 = 0,58 \cdot (118,4 - 45,4) + 45,4 = 87,7 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura na izlazu iz rekuperatora (stanje 2)

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 \rightarrow t_{z2} = \frac{h_2 - 2500 \cdot d_2}{1 + 1,96 \cdot d_2} = \frac{87,7 - 2500 \cdot 0,008}{1 + 1,96 \cdot 0,008} = 66,65^\circ\text{C}$$

Specifična topline

$$q_t = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_2} = \frac{182,5 - 87,7}{0,03 - 0,008} = 4309,1 \text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_t = 185,9 \cdot 4309,1 = 801\,061,7 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedene topline uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_p = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_p} = \frac{801\,061,7}{0,87 \cdot 0,8} = 1\,150\,950,7 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{1\,150\,950,7}{35649} = 32,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 32,3 \cdot 1471,7 = 47\,535,9 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 1\,150\,950,7 \cdot 1471,7 = 1,69 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,69 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 57,8 \text{ tEU}$$

#### 4.1.4. Proračun energetskih ušteda u kombiniranom procesu sušenja s kombinacijom optoka i regeneracije topline

Sadržaj vlage u točki 5 (stanje 5)

$$d_5 = \frac{D_{H_2O}}{D_z \cdot (1 - Y_O)} + d_1 = \frac{185,9}{8450 \cdot (1 - 0,53)} + 0,008 = 0,055 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$$

Sadržaj vlage na ulazu u sušnicu u stanju 4

$$d_3 = d_4 = d_5 - \frac{D_{H_2O}}{D_z} = 0,055 - \frac{185,9}{8450} = 0,033 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$$

Entalpija na ulazu u sušnicu u stanju 4 ako je  $d_3 = d_4 = 0,033 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$

$$h_4 = h_5 = t_{z4} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z4}) \cdot d_4 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,033 = 252,85 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura u točki miješanja (stanje 3)

$$t_{z3} = (1 - Y_O) \cdot t_2 + Y_O \cdot t_5 = (1 - 0,53) \cdot 66,65 + 0,53 \cdot 100 = 84,3^\circ\text{C}$$

Entalpija na ulazu u kalorifer u stanju 3

$$h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 84,3 + (2500 + 1,96 \cdot 84,3) \cdot 0,033 = 172,55 \text{ kJ/kg}$$

Specifična potrošnje topline u kaloriferu

$$q_t = \frac{h_4 - h_3}{d_5 - d_3} = \frac{252,85 - 172,55}{0,055 - 0,033} = 3650 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$$

Ukupno dovedena topline

$$Q_t = D_{H_2O} \cdot q_t = 185,9 \cdot 3650 = 678\,535 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_P = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_P} = \frac{678\,535}{0,87 \cdot 0,8} = 974\,906,6 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{974\,906,6}{35649} = 27,35 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = 27,35 \cdot \tau = 46,7 \cdot 1471,7 = 40\,251 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 974\,906,6 \cdot 1471,7 = 1,44 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,44 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 48,97 \approx 49 \text{ tEU}$$

**Tab. 5.** Usporedba godišnjih ušteda u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka

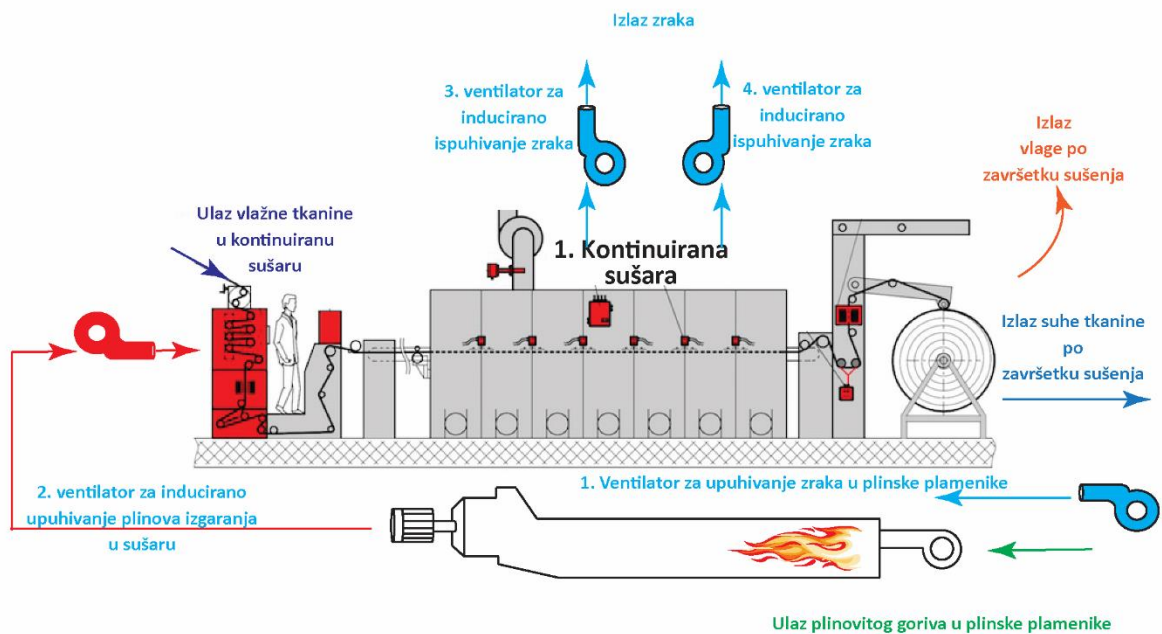
Proces	Volumen potrošenog goriva godišnje ( $m^3$ )	Ušteda goriva godišnje (%)	Godišnja potrošnja topline (tEU)	Ušteda toplinske energije godišnje (%)
jednostavni	$6,87 \cdot 10^4$		$83,6 \cdot 10^9$	-
recirkulativni ili optočni	$5,08 \cdot 10^4$	26,06	$61,8 \cdot 10^9$	26,08
regenerativni	$4,75 \cdot 10^4$	30,86	$57,8 \cdot 10^9$	30,86
kombinirani	$4,03 \cdot 10^4$	41,34	$49 \cdot 10^9$	41,39

#### 4.2. Proračun energetske uštede u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka

Proračun energetske uštede bit će prikazan na primjeru završne faze dorade u procesu mokre obrade tkanina, odnosno bojadisanja tekstilnih tkanina s posebnim osvrtom na proces sušenja u kontinuiranoj sušari sa direktnim plinskim sustavom za zagrijavanje zraka, sl. 34. U novije vrijeme zagrijavanje zraka u kontinuiranim sušarima se provodi direktnim izgaranjem goriva u plinskim plamenicima. Plinski plamenici

su sastavni dio svake komore modularno vezane u sustavu kontinuirane sušare. Plinovi izgaranja se upuhuju u pravilno raspoređene cjevovode unutar komore pomoću ventilatora, a pri tome prolaze kroz filter za pročišćavanje. Temperatura zagrijavanja se sustavom cjevovoda ravnomjerno raspoređuje duž cijele površine tkanine. Ovakvi plamenici zauzimaju manji volumen prostora na indirektna sustava zagrijavanja s kotlom i toplovodima za distribuciju vrelog ulja (ili pare u nekim izvedbama).

U kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka i stupnjem iskorištenja kapaciteta 50,4% (slika 32) suši se 300 kg/h materijala početne vlažnosti 65% do konačne vlažnosti od 8%. Zrak na ulazu u zagrijač (kalorifer) ima  $t_{z1} = 25^{\circ}\text{C}$  i sadržaj vlage  $d_1 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$ , a zagrijavanje protječe do  $160^{\circ}\text{C}$ . Temperatura vlažnog zraka na izlazu iz sušnice je  $100^{\circ}\text{C}$ . Toplinska energija za zagrijavanje dobiva se izgaranjem plinovitog goriva koji ima nižu toplinsku vrijednost  $H_n = 34000 \text{ kJ}/\text{m}^3$ , a stupanj iskorištenja izgaranja je  $\eta_i = 100\%$ . Kao prenosilac topline upotrebljavaju se dimni plinovi, a stupanj iskorištenja prijenosa topline s dimnih plinova na zrak je  $\eta_p = 90\%$ . Izračun godišnju potrošnju goriva ( $\text{m}^3$ , tEU ) i usporediti uštede za sljedeće procese: 1. jednostavni, 2. recirkulativni ili optočni, 3. regenerativni, 4. kombinirani.



Slika 32. Shematski prikaz kontinuirane sušare s šest modularnih komora i direktnim zagrijavanjem zraka plinskim plamenikom za direktno izgaranje

Mase vlage koju treba ukloniti iz materijala tokom sušenja

$$D_{H_2O} = D_{Mvu} \cdot \left( \frac{x_u - x_i}{100 - x_i} \right) = 300 \cdot \left( \frac{65 - 8}{100 - 8} \right) = 185,9 \text{ kg/h}$$

Entalpije se izračunavaju putem izraza

$$h_1 = t_{z1} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z1}) \cdot d_1 = 25 + (2500 + 1,96 \cdot 25) \cdot 0,008 = 45,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,008 = 182,5 \text{ kJ/kg}$$

Masa zraka potrebna za sušenje

$$D_z = \frac{D_{H_2O}}{d_3 - d_2} = \frac{185,9}{0,03 - 0,008} = 8450 \text{ kg/h}$$

#### 4.1.1. Energetski proračun u jednostavnom procesu sušenja

Specifična toplina

$$q_t = \frac{h_2 - h_1}{d_3 - d_2} = \frac{182,5 - 45,4}{0,03 - 0,008} = 6231,8 \text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_t = 185,9 \cdot 6231,8 = 1\,158\,491,6 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_P = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_P} = \frac{1\,158\,491,6}{1 \cdot 0,9} = 1\,287\,212,9 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{1\,287\,212,9}{34000} = 37,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

~~Izračun~~ Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 37,9 \cdot 1471,7 = 55\,718,6 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 1\,287\,212,9 \cdot 1471,7 = 1,89 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,89 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 64,7 \text{ tEU}$$

**4.1.2. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s optokom ili recirkulacijom (recirkulativni, tj. optočni proces uz optok  $Y_0 = 53\%$ )**

Masa svježeg zraka koja cirkulira prilikom sušenja

$$D_{zs} = D_z \cdot (1 - Y_0) = 8450 \cdot (1 - 0,53) = 3971,5 \text{ kg/h}$$



Sadržaj vlage u stanju 4 na izlazu iz sušnice

$$d_4 = \frac{D_{H_2O}}{D_{zs}} + d_1 = \frac{185,9}{3971,5} + 0,008 = 0,055 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$$

Sadržaj vlage u točki miješanja (stanje 2)

$$d_2 = d_4 - \frac{D_{H_2O}}{D_z} = 0,055 - \frac{185,9}{8450} = 0,033 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$$

Entalpija u stanju 4 ako je  $h_4 = h_3$  uz  $d_2 = d_3 = 0,033 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$

$$h_4 = h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,033 = 252,85 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura u točki miješanja (stanje 2)

$$t_{z2} = (1 - Y_0) \cdot t_1 + Y_0 \cdot t_4 = (1 - 0,53) \cdot 25 + 0,53 \cdot 100 = 64,75^\circ\text{C}$$

Entalpija u stanju 2

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 = 64,75 + (2500 + 1,96 \cdot 64,75) \cdot 0,033 = 151,44 \text{ kJ/kg}$$

Specifična potrošnja topline

$$q_t = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_3} = \frac{252,85 - 151,44}{0,055 - 0,033} = 4609,55 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{H_2O} \cdot q_t = 185,9 \cdot 4609,55 = 856\,915,35 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_p = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_p} = \frac{856\,915,35}{1 \cdot 0,9} = 952\,128,2 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{952\,128,2}{34000} = 28 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 28 \cdot 1471,7 = 41\,207,6 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 952\,128,2 \cdot 1471,7 = 1,40 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnje topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,40 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 47,8 \text{ tEU}$$

#### 4.1.3. Proračun energetske uštede u procesu sušenja s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom

uz  $\eta_R = 58\%$

vrijedi jednakost  $d_1 = d_2 = d_3 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$

vrijedi jednakost  $d_4 = d_5 = 0,03 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$  (očitano iz dijagrama pri  $t_{z4} = 100^\circ\text{C}$  i  $h_4 =$

$$h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,008 = 182,5 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija na izlazu iz izmjenjivača  $h_{2a}$  uz jednakost  $d_1 = d_2 = d_{2a} = d_3 = 0,008 \text{ kg}_{\text{vlage}}/\text{kg}_{\text{suhog zraka}}$ )

$$h_{2a} = t_{z2a} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2a}) \cdot d_{2a} = 100 + (2500 + 1,96 \cdot 100) \cdot 0,008 = 118,4 \text{ kJ/kg}$$

entalpija  $h_2$  u točki 2

$$h_2 = \eta_R \cdot (h_{2a} - h_1) + h_1 = 0,58 \cdot (118,4 - 45,4) + 45,4 = 87,7 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura na izlazu iz rekuperatora (stanje 2)

$$h_2 = t_{z2} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z2}) \cdot d_2 \rightarrow t_{z2} = \frac{h_2 - 2500 \cdot d_2}{1 + 1,96 \cdot d_2} = \frac{87,7 - 2500 \cdot 0,008}{1 + 1,96 \cdot 0,008} = 66,65^\circ\text{C}$$

Specifična toplina

$$q_t = \frac{h_3 - h_2}{d_4 - d_2} = \frac{182,5 - 87,7}{0,03 - 0,008} = 4309,1 \text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{H_2O} \cdot q_t = 185,9 \cdot 4309,1 = 801\,061,7 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa topline s ulja na zrak  $\eta_p = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_p} = \frac{801\,061,7}{1 \cdot 0,9} = 890\,068,6 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = V_g \cdot \tau = 26,2 \cdot 1471,7 = 38\,529,1 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 890\,068,6 \cdot 1471,7 = 1,31 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,31 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 44,7 \text{ tEU}$$

#### 4.1.4. Proračun energetskih ušteda u kombiniranom procesu sušenja s kombinacijom optoka i regeneracije topline

Sadržaja vlage u točki 5 (stanje 5)

$$d_5 = \frac{D_{H_2O}}{D_z \cdot (1 - Y_O)} + d_1 = \frac{185,9}{8450 \cdot (1 - 0,53)} + 0,008 = 0,055 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zraka}}$$

Sadržaj vlage na ulazu u sušnicu u stanju 4

$$d_3 = d_4 = d_5 - \frac{D_{H_2O}}{D_z} = 0,055 - \frac{185,9}{8450} = 0,033 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zraka}}$$

Entalpija na ulazu u sušnicu u stanju 4 ako je  $d_3 = d_4 = 0,033 \text{ kg}_{vlage}/\text{kg}_{suhog \text{ zraka}}$

$$h_4 = h_5 = t_{z4} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z4}) \cdot d_4 = 160 + (2500 + 1,96 \cdot 160) \cdot 0,033 = 252,85 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura u točki miješanja (stanje 3)

$$t_{z3} = (1 - Y_O) \cdot t_2 + Y_O \cdot t_5 = (1 - 0,53) \cdot 66,65 + 0,53 \cdot 100 = 84,3^\circ\text{C}$$

Entalpija na ulazu u kalorifer u stanju 3

$$h_3 = t_{z3} + (2500 + 1,96 \cdot t_{z3}) \cdot d_3 = 84,3 + (2500 + 1,96 \cdot 84,3) \cdot 0,033 = 172,55 \text{ kJ/kg}$$

Specifična potrošnja topline u kaloriferu

$$q_t = \frac{h_4 - h_3}{d_5 - d_3} = \frac{252,85 - 172,55}{0,055 - 0,033} = 3650 \text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ukupno dovedena toplina

$$Q_t = D_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_t = 185,9 \cdot 3650 = 678\,535 \text{ kJ/h}$$

Ukupno dovedena toplina uz stupanj iskorištenja izgaranja  $\eta_i = 87\%$  i stupanj iskorištenja prijenosa

toplina s ulja na zrak  $\eta_P = 80\%$

$$\dot{Q}_t = \frac{Q_t}{\eta_i \cdot \eta_P} = \frac{678\,535}{1 \cdot 0,9} = 753\,927,8 \text{ kJ/h}$$

Volumen potrošenog plinovitog goriva

$$V_g = \frac{\dot{Q}_t}{H_n} = \frac{753\,927,8}{34000} = 22,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Godišnja potrošnja goriva uz stupanj iskorištenja kapaciteta je  $\beta = 50,4\%$ , uz rad u jednoj smjeni s 8 - satnim radnim vremenom

$$\tau = \beta \cdot 2920 = 0,504 \cdot 2920 = 1471,7 \text{ sati}$$

Volumen potrošenog goriva godišnje

$$V_{gg} = 27,35 \cdot \tau = 22,2 \cdot 1471,7 = 32\,627,6 \text{ m}^3$$

Godišnja potrošnja topline kJ/h

$$Q_g = \dot{Q}_t \cdot \tau = 753\,927,8 \cdot 1471,7 = 1,11 \cdot 10^9 \text{ kJ/h}$$

Godišnja potrošnja topline u tEU

$$Q_g = \frac{Q_g}{29,3 \cdot 10^6} = \frac{1,11 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 10^6} = 37,9 \text{ tEU}$$

**Tab. 6.** Usporedba godišnjih ušteta u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka

Proces	Volumen potrošenog goriva godišnje ( $m^3$ )	Ušteta goriva godišnje (%)	Godišnja potrošnja topline (tEU)	Ušteta toplinske energije godišnje (%)
jednostavni	$5,57 \cdot 10^4$		$64,7 \cdot 10^9$	-
recirkulativni ili optočni	$4,12 \cdot 10^4$	26,03	$47,8 \cdot 10^9$	26,12
regenerativni	$3,85 \cdot 10^4$	30,88	$44,7 \cdot 10^9$	30,90
kombinirani	$3,26 \cdot 10^4$	41,47	$37,9 \cdot 10^9$	41,42

## 5. Rasprava

U radu je ispitana mogućnost uštede goriva u kontinuiranoj sušari s direktnim i indirektnim zagrijavanjem zraka u na primjeru završne faze dorade u procesu mokre obrade tkanina.

Dosadašnja istraživanja (Purushothama, 2018.) pokazala su ograničenja operativnih temperatura kod indirektnog zagrijavanja u kontinuiranim sušarama opremljenim klasičnim kotlovima za vrenje vode i distribuciju pare toplovodima kroz sustav komora. U ovom radu su istaknuta dva osnovna sustava zagrijavanja zraka kojim se suše tekstilne tkanine u kontinuiranim modularnim sušarama pri visokim temperaturama. Prvi je sustav indirektnog zagrijavanja koji u svojoj izvedbi uključuje vrelouljni kotao za zagrijavanje ulja. Drugi je sustav direktnog zagrijavanja zraka s pretpostavkom da je svaka komora (jedinica kontinuirane sušare) opremljena plamenikom za direktno izgaranje plinskog goriva, a sama mreža distribucijskih cjevovoda za prijenos dimnih plinova, koji služe kao prenosioci toplinske energije, a nalazi se unutar same komore. Također su navedene prednosti i nedostaci spomenutih sustava. Najveća prednost kontinuiranih sušara je rad na visokim operativnim temperaturama sušenja od 200°C što omogućuje istovremeno termofiksiranje i kondicioniranje nakon bojadisanja, postizanje dimenzijske stabilnosti i završnih dimenzija tkanina, mogućnost završnog apliciranja kemikalija za obradu tkanina, kontroliranje ravnotežne vlage, površinske mase, sakupljanja i mogućnost fiksiranja vodonepropusnog sloja tkanina (Purushothama, 2018.). Prema dosadašnjim istraživanjima (Budin i Mihelić – Bogdanić, 2014.) jednostavan proces, koji uključuje sušenje s jednokratnim strujanjem zraka je najrasprostranjeniji. Najveći potencijal energetske uštede goriva je u vidu smanjenja gubitaka topline. U sušarama se najčešće prijenos topline odvija konvekcijom uz struju vrućeg zraka koji se potom ispušta u okolinu. Energetske uštede goriva u postupcima sušenja u sušarama s direktnim i indirektnim zagrijavanjem zraka mogu se postići optimizacijom postojećih procesa, što je ispitano u radu.

U diplomskome radu prikazane su metode poboljšanja procesa sušenja u kontinuiranoj sušari s direktnim i indirektnim zagrijavanjem zraka (recirkulativni ili optočni, regenerativni i kombinirani proces) te izvršen je proračun energetske uštede goriva.

U tablici 5 prikazani su rezultati godišnjih ušteda goriva i toplinske energije u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka. Kombinirani proces sušenja s optokom i regeneracijom topline pokazuje najveće godišnja uštede toplinske energije od čak 41,39%, a time i najveću godišnju uštedu goriva od 41,34%. Usporedbe radi optočni proces sušenja donosi godišnje uštede toplinske energije od 26,08%, a regenerativni procesom se povećavaju mogućnosti godišnjih ušteda toplinske energije do 30,86%.

U tablici 6 prikazani su rezultati godišnjih ušteda goriva i toplinske energije u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka. Kombinirani proces sušenja s optokom i regeneracijom topline pokazuje najveće godišnja uštede toplinske energije od čak 41,42%, a time i najveću godišnju uštedu goriva od 41,47%. Usporedbe radi optočni proces sušenja donosi godišnje uštede toplinske energije od 26,12%, a regenerativni procesom se povećavaju mogućnosti godišnjih ušteda toplinske energije za 4,78% u odnosu na optočni proces.

Rezultati analize parametara godišnje uštede goriva u kontinuiranoj sušari s direktnim i indirektnim zagrijavanjem zraka prikazani su u tablici 7. Analizom indirektnog i direktnog zagrijavanja zraka utvrđeno je da postupak sušenja s direktnim zagrijavanjem zraka daje bolje rezultate.

Godišnja ušteda goriva u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka iznosi 18,92% u odnosu na sustav indirektnog zagrijavanja zraka vrelouljnim kotlom pri usporedbi jednostavnog procesa. Proces s optokom ili recirkulacijom rezultirao je uštedama od 18,90% u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka. Postupak rekuperacije pokazuje smanjenje potrošnje goriva za 18,95%, dok ušteda goriva kod kombiniranog procesa s optokom i regeneracijom topline pokazuje energetske uštede od 19,11%. Uočljiva je značajnija ušteda goriva kod kombiniranog procesa u sušari s direktnim zagrijavanjem

zraka ( 19,11%) u usporedbi s drugim procesima, što možemo istaknuti kao značajnu prednost ovog načina sušenja.

**Tab. 7.** Usporedba godišnjih ušteda goriva u kontinuiranoj sušari s indirektnim i direktnim zagrijavanjem zraka

Proces	Volumen potrošenog goriva godišnje ( $m^3$ ) u kontinuiranoj sušari s indirektnim zagrijavanjem zraka	Volumen potrošenog goriva godišnje ( $m^3$ ) u kontinuiranoj sušari s direktnim zagrijavanjem zraka	Ušteda goriva godišnje (%)
jednostavni	$6,87 \cdot 10^4$	$5,57 \cdot 10^4$	18,92
recirkulativni ili optočni	$5,08 \cdot 10^4$	$4,12 \cdot 10^4$	18,90
regenerativni	$4,75 \cdot 10^4$	$3,85 \cdot 10^4$	18,95
kombinirani	$4,03 \cdot 10^4$	$3,26 \cdot 10^4$	19,11

Generalno optimizacija radnog procesa sušenja s direktnim zagrijavanjem procesa koja obuhvaća kombinaciju optoka zraka i regeneraciju topline rezultirala je većim energetske uštedama koje iznose 19,11%, što je naposljetku važno kako i za ekonomiju tako i za zaštitu okoliša. Zbog postignutih povoljnih energetske ušteda, ovaj se je proces pokazao kao najbolje moći izbor.



## 6. Zaključak

Sušenje, kao energetska intenzivna proces i jedna od najčešće primjenjivanih procesnih operacija industrijske proizvodnje, ima značajnu ulogu u različitim sektorima industrije, od tekstilne do farmaceutske, te značajno utječe na ukupnu energetska potrošnju. Primjenjuje se s ciljem smanjenja ukupne mase vlage materijala, smanjenja štetnog utjecaja vlage na materijal i kao metoda konzerviranja hrane. Procesima sušenja povećava se stupanj iskorištenja proizvodnih procesa.

Različitim mehaničkim, toplinskim i fizikalno – kemijskim postupcima može se ukloniti vlagu iz materijala, u svrhu dobivanja suhog materijala dobre kvalitete. Sušenje se odvija uz istovremeni proces prijenosa topline i mase, pri čemu se toplina dovodi kako bi se uklonila vlaga u materijalu, dok se masa prenosi kroz materijal. Osim uklanjanja suvišne vlage nakon obrade tekstilnih materijala, sušenjem se mogu provesti određeni postupci oplemenjivanja tkanina, od aplikacije kemijskih sredstava do postizanja finalnih dimenzija tekstilnih materijala, termofiksiranja i termosoliranja.

Prema načinu dovođenja topline materijalu, koji se suši, razlikuje se konvektivno, konduktivno, radijacijsko, mikrovalno i sublimacijsko sušenje. Sušenje se u industriji odvija u uređajima za sušenje (sušare), koje se razlikuju prema načinu dovođenja topline (direktno ili indirektno zagrijavanje), vrsti ogrjevnog medija (zrak, vodena para ili neki drugi plin), visini radnog tlaka (atmosferski, vakuum), provedbi procesa sušenja (kontinuirana, diskontinuirana), te smjeru strujanja zraka i materijala.

U 21. stoljeću znanost i tehnologija nastoje zamijeniti konvencionalne tehnike industrijskog procesa sušenja proizvoda, metodama i tehnikama koje su naprednije, odnosno onima koje istovremeno omogućuju bržu i efikasniju proizvodnju uz veću energetska učinkovitost, smanjenje opterećenja za okoliš i povećanje ekonomičnosti.

Stoga je potrebno primijeniti metode optimizacije u procesima sušenja jer postoji velik spektar materijala koji zahtijevaju posebne metode sušenja. U većini slučajeva metode unaprjeđenja procesa sušenja

uključuju dodatno zagrijavanje zraka u sušnici, višestupanjsko zagrijavanje zraka, optok ili recirkulacija, povrat otpadne topline, odnosno regeneraciju, te kombinaciju optoka i regeneracije topline. U diplomskom radu dan je uvid u pojedine procese optimizacije sušenja, te su istaknute važnije funkcije navedenih procesa, kao i njihova potencijalna primjena uz kalkulaciju energetske uštede. Analiza dobivenih rezultata optimizacije procesa sušenja na primjeru kontinuirane sušare uz usporedbu indirektnog i direktnog sustava zagrijavanja zraka, pokazala je kako je sustav kontinuirane sušare s direktnim zagrijavanjem zraka ugradnjom plamenika u komore, optimalniji pri navedenim radnim temperaturama sušenja. Optimizacija procesa sušenja s direktnim zagrijavanjem procesa koja obuhvaća kombinaciju optoka zraka i regeneraciju topline rezultirala je najvećim toplinskim uštedama od 41,42% i najvećim godišnjim uštedama goriva od 19,11%, što je naposljetku važno kako i za ekonomiju tako i za zaštitu okoliša.

U tekstilnoj industriji potrošnja goriva jedan je od glavnih faktora ukupne troškovne analize i s obzirom na nestabilnost cijena goriva i energetske potrošnje u različitim aspektima proizvodnog procesa, glavni fokus ove industrije trebao bi biti na poboljšanju energetske učinkovitosti uz minimalno zagađenje okoliša. Postoje različite mogućnosti poboljšanja energetske učinkovitosti, a njihova isplativost i ekološka prihvatljivost uvelike pridonose njihovoj primjeni. Međutim, čak se i troškovno učinkovite opcije često ne provode u tekstilnim tvornicama zbog uglavnom ograničenih informacija o provedbi mjera energetske učinkovitosti, posebno s obzirom na činjenicu da su većina tekstilnih pogona kategorizirana kao mala i srednja poduzeća. Shodno tome od velike važnosti je širiti istraživanja i znanja o tehnološkim unaprijeđenima i praksi energetske učinkovitosti u tekstilnim pogonima jer to područje, ostavlja mnogo prostora za buduća istraživanja.

## 7. Literatura

Abbi, Y.P. i Jain, S. *Handbook on Energy Audit and Environment Management*, New Delhi, India: The Energy and Resource Institute, 2006., ISBN: 81-7993-092-0.

Akyol, U.; Erhan Akan. A. i Durak, A. *Simulation and thermodynamic analysis of a hot-air textile drying process*. The Journal of The Textile Institute, 2014., Vol. 106, Br. 3, str. 260-274.

Anandharamakrishnan, C., *Handbook of drying for dairy products*, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2017., ISBN: 9781118930502.

Barun I. *Vakuum sušenje pentaeritrola* [Diplomski rad], Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2008., Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/374353.IRENA\\_BARUN.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/374353.IRENA_BARUN.pdf). [15.7.2020.]

Bontempi, A. *Energetic efficiency in industrial dryers: Review and experimental proposals*, [Magistarski rad]. Curitiba, Brazil; Pontifical Catholic University of Parana, 2004.

Brookstein, D. *Energy Consumption and Conservation: Textile Drying*, ACS Symposium Series, 1979., str. 243–254. doi:10.1021/bk-1979-0107.ch017.

Budin. R. i Mihelić-Bogdanić, A. *Application of solar energy in drying processes*, Energy Conversion and Management, 1994., Vol. 35, Br. 2, str. 97-103.

Budin. R. i Mihelić-Bogdanić, A. *Reducing Energy Supply In The Drying Process*, Energy Engineering, 2011., Vol. 108, Br. 2, str. 6-16.

Budin. R. i Mihelić-Bogdanić, A. *Izvori i gospodarenje energijom u industriji*, Element d.o.o., 2014., ISBN: 978-953-197-672-5

Buyukakinci B. *Usage of Microwave Energy in Turkish Textile Production Sector*. Energy Procedia, 2012., Vol. 14, str. 424–431.

Carr, W.W.; Lee, H.S. i Ok, H. *Drying of Textile Products*. Chapter 34, In: Mujumdar A.S, ed. by. *Handbook of Industrial Drying*, treće izdanje, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006., ISBN: 978-0-4291-3609-2.

Carr W.W, Lee H. S, Ok H. *Drying of Textile Products*. Chapter 38, In: Mujumdar, A. S. *Handbook of industrial drying*, četvrto izdanje, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015., ISBN: 978-1-4665-9666-5.

Cay, A.; Tarakçioğlu, I. i Hepbasli A. *Exergetic Analysis of Textile Convective Drying with Stenters by Subsystem Models: Part 1—Exergetic Modeling and Evaluation*, *Drying Technology*, 2010., Vol. 28, Br. 12, str. 1359-1367.

Cay, A.; Tarakçioğlu, I. i Hepbasli A. *Exergetic performance assessment of a stenter system in a textile finishing mill*, *International Journal of Energy Research*, 2007., Vol. 31, Br. 13, str. 1251-1265.

Czyż, M. i Pniewski, T. Thermostability of Freeze-Dried Plant-Made VLP-Based Vaccines, In: *Sustainable Drying Technologies*, Jorge del Real Olvera (Ed.), London, United Kingdom: IntechOpen, 2016., str. 8-35, ISBN: 978-953-51-2566-2.

Čunko, R. *Ispitivanje tekstila*, Zagreb, Hrvatska: Sveučilište u Zagrebu, 1995., ISBN 86-329-0180-X.

del Real-Olvera, J. Principles of Sustainable Drying, In: *Sustainable Drying Technologies*, Jorge del Real Olvera (Ed.), London, United Kingdom: IntechOpen, 2016., str. 1-5, ISBN: 978-953-51-2566-2.

Desai S. *Handbook on Energy Audit* (Eds.), New Delhi, India: McGraw Hill Education Private Ltd., 2015., ISBN: 978-93-392-2133-1.

Dhayaneswaran, Y. i Ashokkumar, L. *A Study on Energy Conservation in Textile Industry*, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 2013., Vol. 94, Br. 1, str. 53-60.

Dincer, I. i Zamfirescu, C. *Basics of Drying*. Chapter 2. In: "Drying Phenomena: Theory and Applications, Prvo izdanje, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2016., str.67-98. ISBN 978-1-119-97586-1.

Dryden I. G. C. *The Efficient Use of Energy*, Drugo izdanje, London, United Kingdom: Butterworth & Co. Ltd., 1982. ISBN: 978-0-408-01250-8, DOI: 10.1016/C2013-0-00885-7.

Europska komisija, 2003.[Online]. *Reference Document on Best Available Techniques for the Textiles Industry*. Available at: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download\\_TXT.cfm](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download_TXT.cfm) [17.12.2019.]

Freire, B. F.; Freire, M. i Freire, J. T.: An Overview on Neural Networks in Physical Properties and Drying Technology, In: Martynenko, A. i Bück, A. *Intelligent Control in Drying*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019., str. 281-304, DOI: 10.1201/9780429443183-15.

Galoppi, G.; Ferrari, L.; Ferrara, G. i Antonio Carnevale, E. *Experimental investigation on industrial drying process of cotton yarn bobbins: energy consumption and drying time*, Energy Procedia, 2017., Vol. 126, str. 361-368.

Gangadhar, V. S. *Dehydration and Characterization of Fruity Vegetables using Cabinet Solar Dryer*, Drugo poglavlje, In: Design and development of typical cabinet solar dryer. Ph.D. Thesis. Department of Physics, Ahmednagar College, Ahmednagar, India, 2016.

Gigler, J. K.; van Loon, W. K. P., van den Berg, J. V.; Sonneveld, C. i Meerdink, G.: *Natural wind drying of willow stems*, Biomass and Bioenergy, 2000., Vol. 19, Br. 3, str. 153–63.

Griffin, W. L. i Hendrix, W. A. *Microwave Heating and Drying in Textile Processing-Present and Future*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, IA, Vol. 22, Br. 1, str. 115–20.

Hasanbeigi, A. *Energy-Efficiency Improvement Opportunities for the Textile Industry*, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, projekt DE-AC02-05CH11231 financiran od

strane Kineske energetske zaklade programom održive energije i Američkim odjelom za energiju, 2010.

Hot Air Stenter - Conveyor Relax Dryer and 3 Bowl Inclined Padding Mangle Manufacturer [Online]. Lucyengineering.com. Dostupno na: <https://www.lucyengineering.com/stenter-machine.html>. [15.08.2020]

*Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry*, Drugo izdanje, Washington, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory for United States Department of Energy, 2007., ISBN: 978-3-527-31559-8, 2012.

Jones, P. L. i Rowley, A. T. *Dielectric Drying*, *Drying Technology*, 1996., Vol. 14, Br. 5, str. 1063–1098.

Katić, Z. i Pliješćić, S. *Vlaga i vlažnost zrna*. U: Katić, Z. (ur.), U: *Sušenje i sušare u poljoprivredi*. Zagreb, Hrvatska: Multigraf, 1997. ISBN: 953-6060-07-08.

Katović, D. i Bischof Vukušić, S. Microwave device for drying and finishing of textiles, In: *Proceedings of the 83<sup>rd</sup> World Conference of the Textile Institute*, Shanghai, China 2004. str. 1145–1147.

Katović, D.; Bischof Vukušić, S. i Flinčec Grgac, S. *Primjena mikrovalova u procesima oplemenjivanja*, *Tekstil*, 2005., Vol. 54, Br. 7, str. 319-325.

Keey, R. B. Heat transfer, In: *Drying Principles and Practice*, Oxford, United Kingdom: Pergamon Press, 1972.

Kemp, I. Fundamentals of Energy Analysis of Dryers. In: *Modern Drying Technology*, Volume 4, Energy, Tsotsas, E. i Mujumdar, A. S. (Eds.), Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2011., DOI: 10.1002/9783527631681.

Kudra, T., Mujumdar, A. S. *Advanced Drying Technologies Drugo izdanje*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009., ISBN: 978-1-4200-7387-4.

Land, van't C. M. *Industrial Drying Equipment: Selection and Application*. New York, USA: Marcel Decker Inc., 1991., ISBN: 0-8247-8316-6.

MC Solar. 2020. *Naslovnica - MC Solar*. [online] Dostupno na: <https://mcsolar.hr/> [10.08.2020.].

Mikuš, D. *Koncept održivog razvoja u tekstilnoj industriji* [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet; 2019., Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:148:453553>. [15.07.2020.].

Minea, V. *Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019., ISBN: 978-1-138-04125-7.

Mueller, D. *A New Design of Thermal-Fluid Systems Elective: Description, Observations, and Experiences*, In: Proceedings of 2006 ASEE Annual Conference, Chicago, Illinois, USA, 2006.

Mujumdar, A. S. *Handbook of industrial drying*, Četvrto izdanje, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015., ISBN: 978-1-4665-9666-5.

Nedić, M.; Tolmač, J.; Prvulović, S. i Tolmač, D. *Proces sušenja i sušare sa aspekta obnovljivih izvora energije*, U: Zbornik 32. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Processing '19, str. 149-154, 2019. Dostupno na: <https://izdanja.smeits.rs/index.php/ptk/article/view/4901>. [16.07.2020.]

Ogulata, T. R. *Utilization of waste-heat recovery in textile drying*, Applied Energy, 2004., Vol. 79, str. 41–49, DOI: 0.1016/j.apenergy.2003.12.002.

Ogura, H. i Mujumdar, A. *Proposal for a novel chemical heat pump dryer*, Drying Technology, 2000., Vol. 18, Br. 4-5, str.1033-1053.

Ogura, H.; Yamamoto, T.; Otsubo, Y.; Ishida, H.; Kage, H. i Mujumdar, A. S. *A Control Strategy for a Chemical Heat Pump Dryer*, Drying Technology, 2005., Vol. 23., str. 1189-1203.

Ozturk, H. K. *Energy usage and cost in textile industry: A case study for Turkey*, Energy, 2005., Vol. 30, Br. 13, str. 2424–2446.

Pavunc, M.; Vujasinović, E. i Matijević, I. Tekstil u kontekstu održivog razvoja, Tekstil, Vol. 63, Br. 5-6, str. 195-203.

Perry, R.H. i Chilton, C.H. *Chemical Engineers Handbook*. New York: McGraw Hill, 1973.

Purushothama, B. *Handbook of value addition processes for fabrics*. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt Ltd., 2018., ISBN: 978-93-85059-92-6.

Radio Frequency equipment for drying and thermal processing [Online]. Dostupno na: <https://www.stalam.com/eng/>. [03.02.2020.]

Santos, R. M.; Parra Llanos, J. W.; Quadri, M. B. i da Rocha, I. C. C. *Study of Drying and Consumption of Natural Gas in a Textile Stenter of Direct Heating*, Drying Technology, Vol. 33, 2015., str. 37–54.

Sito, S.; Šket, B.; Kurnik, M., Kraljević, A. i Hrvojčec, H. *Primjena nove tehnike sušenja za proizvodnju čipsa od jabuke.*, Glasnik Zaštite Bilja, 2014., Vol. 37, Br. 3, str. 67-73.

Solar Drying - Technical Brief, ITDG - Intermediate Technology Development Group. 4 pgs., s.a., <https://practicalaction.org/> [10.08.2020.]

Spooner, W. W. *Textile drying machinery*, Journal of Society of Dryers and Colourists, Vol. 55, Br. 6, 1939., str. 303-308.

Stanić M. *Rekuperatori zraka* [Završni rad]. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek; 2018., Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:044715>. [10.08.2020.]

*Tehnička enciklopedija. Svezak 1.* Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963.

Thermal fluid calders, electric calibrators and interconnectors | Pyroblock [Online]. Piroblock. Dostupno na: <https://www.pirobloc.com/en>, [19.11.2019.]



Timar-Balazsy, A. i Eastop, D. *Chemical Principles of Textile Conservation*. Routledge, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 1998., ISBN - 0: 7506-2620-8.

Topić, R.; Božović, M. i Topić, G. *Sušenje i sušare sa aspekta obnovljivih izvora energije i održivog razvoja*, Tehnika, Vol. 72, Br. 1, 2017a., str. 61-67.

Topić, R.; Tasić, J. R.; Panić, L. i Topić G. R. *Karakteristična rešenja solarnih sušara i solarnih sušara sa toplotnom pompom*, In: Book of Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific Conference On Production Engineering, Development and Modernization of Production, 2017b., str.1 27-133.

Tripalo, B. i Viličić, Ž. *Sušenje*, *Tehnička enciklopedija, svezak 12*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, Hrvatska, 1992., str.451-461.

Tsotsas E, and Mujumdar A.S. *Modern Drying Technology*, Volume 4: Energy Savings, First Edition, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.,2012., ISBN: 978-3-527-31559-8.

Tsotsas E, Mujumdar A. S. *Modern Drying Technology*, Volumen 5: Process Intensification, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2014., ISBN: 978-3-527-31560-4.

Uddin, F. *Energy Management and Energy Crisis in Textile Finishing*, American Journal of Energy Research, 2014., Vol. 2, Br. 3, str. 53-59.

Wernecke, J. i Wernecke, R. Chapter 2: Thermodynamic Terms and Definitions.Chapter 8:Applications in the Food and Beverage Industry. In: *Industrial Moisture and Humidity Measurement: A Practical Guide*, Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.,2014., ISBN: 978-3-527-65244-0.