

Kontejnerska kondenzacijska sušara piljenog drva

Deriš, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:653030>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Deriš

Zagreb, 2021 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Saša Mudrinić, dipl. ing.

Dr. sc. Luka Boban, mag. ing.

Student:

Tomislav Deriš

Zagreb, 2021 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru Doc. dr. sc. Saši Mudriniću, dipl. ing. i komentoru Dr. sc. Luki Bobanu, mag. ing. na pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i podršci tijekom studija i izrade diplomskog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj djevojci Mariji na bezuvjetnoj podršci i što je uvijek bila tu za mene.

Tomislav Deriš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Deriš**

JMBAG: 0035204462

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kontejnerska kondenzacijska sušara piljenog drva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Container dehumidifying dryer of the sawn timber**

Opis zadatka:

U drvnjoj industriji sušenje sirove drvene mase ima vrlo veliku važnost jer drvo nakon sječe ima visoki sadržaj vlage, od 50% do 100%, a neke vrste i do 200%, što utječe na njegova fizikalna svojstva kao što su gustoća, čvrstoća i tvrdoća. Većina vlage se mora odstraniti do nekog određenog sadržaja vlage koji ovisi o tehnološkim zahtjevima i/ili konačnoj destinaciji proizvoda, a obično je to u rasponu od 8% do 10%.

Kondenzacijske sušare pripadaju novim tehnologijama sušenja drveta koje imaju veliki potencijal za uštedu energije. One u svom radu koriste dizalicu topline koja služi za odvlaživanje optoćnog zraka u sušari tako da nema potrebe za uvođenjem svježeg zraka iz okoliša. Time je dobiven zatvoreni sustav strujanja toplog zraka čime se ostvaruje znatna ušteda u energiji. Temperatura zraka u takvim sušarama može iznositi i do 60 °C što omogućuje kvalitetno i brzo sušenje svih vrsta drvene građe.

U radu je potrebno prikazati projektno rješenje kontejnerske kondenzacijske sušare za sušenje piljenog drva bukve i hrasta. Sušara je kontejnerskog tipa (brodski kontejner standardne veličine 40 stopa) tako da se lako vrši njezin utovar i prijenos do konačnog mjesta ugradnje. Sušaru je potrebno projektirati za zimske uvjete rada uz okolišnu temperaturu zraka -9 °C. Kao radna tvar u dizalici topline koristi se R134a.

Rad treba sadržavati:

1. Teorijske osnove sušenja piljenog drva (drvene mase) i drvnih proizvoda;
2. Proračun količine piljenog drva koju je moguće smjestiti u sušaru;
3. Proračun toplinskog opterećenja zadane sušare, termodinamički proračun isparivača i kondenzatora dizalice topline te proračun količine optoćnog zraka, broja i snage ventilatora;
4. Tehnički opis sušare te opis vođenja i regulacije režima sušenja;
5. Dispozicijski crtež sušare.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

6. svibnja 2021.

8. srpnja 2021.

12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

doc. dr. sc. Saša Mudrinić

Dr. sc. Luka Boban

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	XIV
SUMMARY	XV
1. UVOD	1
2. SUŠENJE U DRVNOJ INDUSTRIJI	3
2.1. Struktura drva	3
2.2. Vлага u drvu	4
2.3. Kinetika sušenja drva	6
2.3.1. Faza konstantne brzine sušenja	7
2.3.2. Prva faza opadajuće brzine sušenja	8
2.3.3. Druga faza opadajuće brzine sušenja	9
2.4. Moguće greške sušenja	10
2.4.1. Pukotine	10
2.4.2. Izvijanje (promjena oblika piljene građe)	11
2.4.3. Zakoravanje	12
2.4.4. Promjena boje	13
3. KONVEKTIVNO SUŠENJE PILJENE DRVNE GRAĐE	15
3.1. Komorne konvektivne sušare	15
3.2. Kondenzacijske sušare	20
4. DIMENZIONIRANJE SLOŽAJA I KOMPONENTI KONDENZACIJSKE SUŠARE DRVA	23
4.1. Dimenzioniranje složaja	23
4.2. Proračun potrebne količine zraka, broja ventilatora te pada tlaka unutar sušare	28
4.3. Odabrani režim sušenja	32
4.4. Proračun potrebne snage predgrijača	32
4.4.1. Proračun transmisivskih gubitaka na temperaturi predgrijanja	33
4.4.2. Proračun snage potrebne za zagrijavanje zraka, piljenica, letvica i greda na temperaturu predgrijanja	38
4.4.3. Potrebna snaga predgrijača	41
4.5. Proračun potrebne snage isparivača i kondenzatora	41
4.6. Dimenzioniranje komponenti dizalice topline	53
4.6.1. Dimenzioniranje cjevovoda dizalice topline	57
4.6.1.1. Usisni vod	57
4.6.1.2. Tlačni vod	57
4.6.1.3. Kapljevinski vod	58
4.6.2. Dimenzioniranje zrakom hlađenog kondenzatora	59

4.6.2.1.	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka	67
4.6.2.2.	Zona II (kondenzacija u cijevi)	70
4.6.2.3.	Zona I (pregrijana para radne tvari u cijevima)	71
4.6.2.4.	Zona III (kapljevina radne tvari u cijevima).....	73
4.6.3.	Dimenzioniranje isparivača za hlađenje zraka	75
4.6.3.1.	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka	83
4.6.3.2.	Zona I (isparavanje u cijevi)	86
4.6.3.3.	Zona II (pregrijana para radne tvari u cijevima)	87
5.	TEHNIČKI OPIS KONTEJNERSKE KONDENZACIJSKE SUŠARE I OPIS VOĐENJA PROCESA	90
6.	ZAKLJUČAK.....	94
	LITERATURA.....	95
	PRILOZI	97

POPIS SLIKA

Slika 1.	Poprečni presjek debla (A-vanjska kora, B- unutarnja kora, C- kambij, D- bjelika, E- srž, F- srčika, G- godovi) [4].....	4
Slika 2.	Prikaz ravnotežne vlažnosti u funkciji temperature i relativne vlažnosti [5]	6
Slika 3.	Grafovi kinetike sušenja u ovisnosti o raznim veličinama [3].....	7
Slika 4.	Shema prijenosa mase i energije tijekom faze konstantne brzine sušenja [2]	8
Slika 5.	Shema prijenosa mase i energije tijekom druge faze opadajuće brzine sušenja [2]	9
Slika 6.	Čeone pukotine [4]	11
Slika 7.	Primjeri mogućih oblika izvijanja [4]	12
Slika 8.	Prikaz ispitivanja uzorka na zakoravanje [7]	13
Slika 9.	Obojenje piljenica uslijed djelovanja gljivica tijekom sušenja [4]	14
Slika 10.	Primjer slaganja u pravilan složaj za prirodno sušenje u natkrivenom prostoru. [3]	15
Slika 11.	Shema komorne konvektivne sušare [2].....	17
Slika 12.	Shema kondenzacijske sušare [4].....	21
Slika 13.	Karakteristične dimenzije složaja.[11]	23
Slika 14.	Vanjske dimenzije standardnog broskog kontejnera koji se koristi kao komora za sušenje.	25
Slika 15.	Bokocrt složaja drva.	26
Slika 16.	Tlocrt složaja drva.	27
Slika 17.	Bokocrt složaja unutar sušare.	27
Slika 18.	Tlocrt složaja unutar sušare	27
Slika 19.	Prikaz karakterističnih pozicija za računanje pada tlaka	30
Slika 20.	Shema procesa sušenja	43
Slika 21.	Shematski prikaz procesa u h - x dijagramu	43
Slika 22.	Shematski prikaz dizalice topline zrak-zrak	54
Slika 23.	Tijek procesa dizalice topline zrak-zrak u $\log p$ - h dijagramu	55
Slika 24.	Konstruktivski parametri kondenzatora[21]	61
Slika 25.	ϑ -A dijagram kondenzatora [21]	62
Slika 26.	Konstruktivski parametri isparivača[21]	78
Slika 27.	ϑ -A dijagram isparivača.....	79
Slika 28.	Primjer postavljanja ubodnih elektroda [6]	93

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Karakteristični iznosi debljine letvica u ovisnosti o debljini piljenica.....	24
Tablica 2.	Karakteristični razmaci između letvica u uzdužnom smjeru piljenice u odnosu na debljinu piljenice.	24
Tablica 3.	Iznosi veličina potrebnih za računanje pada tlaka između karakterističnih točaka	31
Tablica 4.	Odabrani režim sušenja	32
Tablica 5.	Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s unutarnje strane na temperaturi predgrijavanja.....	35
Tablica 6.	Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane na temperaturi predgrijavanja	36
Tablica 7.	Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na točki zasićenja vlakanaca za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta.....	51
Tablica 8.	Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na kraju procesa za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta	52
Tablica 9.	Rezultati proračuna potrebnih snaga isparivača i kondenzatora u odabranim radnim točkama za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta	53
Tablica 10.	Svojstva radne tvari u karakterističnim točkama procesa dizalice topline	55
Tablica 11.	Ovisnost koeficijenta C1A o omjeru Ldeqv	68
Tablica 12.	Sažetak rezultata proračuna zrakom hlađenog kondenzatora (zadnja iteracija)	75
Tablica 13.	Ovisnost koeficijenta C1A o omjeru Ldeqv	83
Tablica 14.	Ovisnost koeficijenta C o temperaturi isparavanja θi	86
Tablica 15.	Sažetak rezultata proračuna isparivača za hlađenje zraka (zadnja iteracija)	89
Tablica 16.	Osnovne tehničke karakteristike kontejnerske kondenzacijske sušare piljenog drva bukve i hrasta	90

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Crtež broj 1 Dispozicijski nacrt kontejnerske kondenzacijske sušare za drvo sa shematskim prikazom komponenti

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{bok}	m^2	Površina bočne plohe
A_{e1}	m^2	Vanjska površina po jednom metru izmjenjivača
A_f	m^2	Površina lamela po jednom metru izmjenjivača
A_{i1}	m^2	Unutarnja površina po jednom metru izmjenjivača
A_{ii}	m^2	Unutarnja površina prijelaza topline u i -toj zoni kondenzatora / isparivača
$A_{kom,suš, propr,pres}$	m^2	Površina poprečnog presjeka prazne komore za sušenje
A_{krov}	m^2	Površina krovne plohe
A_{mt}	m^2	Vanjska površina cijevi između lamela po jednom metru izmjenjivača
A_{pod}	m^2	Površina podne plohe
$A_{pros,povr}$	m^2	Prostrujna površina zraka kroz složaj
$A_{prov,povr,ij}$	m^2	Prostrujna površina zraka između i -te i j -te točke u komori za sušenje
$A_{sl,popr,pres}$	m^2	Površina poprečnom presjeka jednog složaja
$A_{sl,popr,pres,uk}$	m^2	Površina poprečnog presjeka svih složaja
$A_{v,p}$	m^2	Površina vrata i poledinske plohe
A_z	m	Najmanja površina za strujanje zraka
B	m	Širina kondenzatora / isparivača
B'	-	Karakteristični parametar poda
c_i	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
C_K	-	Faktor otpora spoja između cijevi i lamele
$c_{p,d}$	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku
$c_{p, stdrva}$	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet suhe tvari drva
$c_{p,z}$	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku
c_{szp}	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare radne tvari
c_{vk}	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet vrele kapljevine radne tvari
c_w	$J/(kg\ K)$	Specifični toplinski kapacitet vode
d_e	m	Vanjski promjer cijevi
d_{eqv}	m	Ekvivalentni promjer
d_{grede}	m	Duljina greda
d_i	m	Unutarnji promjer cijevi
$d_{kom,suš}$	m	Duljina komore za sušenje
$d_{letvice}$	m	Širina letvice

$d_{u,i}$	m	Promjer cijevi u i -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
E	-	Efikasnost lamela
f_{g1}	-	Korekcijski faktor za utjecaj godišnje vanjske temperature
f_{g2}	-	Faktor smanjenja temperaturne razlike
f_i	m	Debljina lamela
G	kg/(m ² s)	Gustoća masenog toka radne tvari
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
Gr	-	<i>Grashofov</i> bezdimenzijski broj
G_w	-	Korekcijski faktor za utjecaj podzemnih voda
H	m	Visina ravne uspravne stijenke / visina izmjenjivača
$h_{(1+x)ri,b,j}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja bukovih piljenica
$h_{(1+x)ri,h,j}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja hrastovih piljenica
$h_{(1+x)ri,j}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$h_{(1+x)zr1}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka na ulazu u kondenzator / isparivač
$h_{(1+x)zr2}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka na izlazu iz kondenzatora / isparivača
$h_{(1+x)zrII}$	J/kg	Specifična entalpija vlažnog zraka na ulazu u zonu II isparivača
h_{grede}	m	Visina greda
h_i	J/kg	Specifična entalpija radne tvari u i -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
$h_{kom,suš}$	m	Visina komore za sušenje
r_l	J/kg	Specifična toplota isparavanja / kondenzacije radne tvari
$h_{letvice}$	m	Visina letvica
h_{sl}	m	Visina složaja
i_h	-	Broj piljenica u vertikalnom smjeru jednog složaja
i_{in}	-	Broj ulaznih cijevi
i_r	-	Broj redova
i_t	-	Broj cijevi u jednom redu
k_{ei}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline u i -toj zoni kondenzatora / isparivača sveden na vanjsku površinu
k_{ii}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline u i -toj zoni kondenzatora / isparivača sveden na unutarnju površinu
$k_{R,ij}$	-	Faktor otpora strujanja između i -te i j -te točke u komori za sušenje
L	m	Dubina izmjenjivača

L_{1i}	m	Duljina cijevi u jednom redu u i -toj zoni kondenzatora / isparivača
$L_{\text{karak}}t$	m	Karakteristična dimenzija
L_{ovi}	m	Ukupna duljina cijevi u i -toj zoni kondenzatora / isparivača
l_x	m	Duljina složaja
m_{greda}	kg	Masa greda
m_{let}	kg	Masa letvica
$m_{\text{pilj,bukva}}$	kg	Masa bukovih piljenica
$m_{\text{pilj,hrast}}$	kg	Masa hrastovih piljenica
m_{st}	kg	Masa suhe tvari
$m_{\text{st,bukva}}$	kg	Masa suhe tvari bukovih piljenica
$m_{\text{st,greda}}$	kg	Masa suhe tvari greda
$m_{\text{st,hrast}}$	kg	Masa suhe tvari hrastovih piljenica
$m_{\text{st,let}}$	kg	Masa suhe tvari letvica
m_w	kg	masa vode
$m_{w,\text{bukva}}$	kg	Masa vode sadržane u bukovim piljenicama
$m_{w,\text{greda}}$	kg	Masa vode sadržane u gredama
$m_{w,\text{hrast}}$	kg	Masa vode sadržane u hrastovim piljenicama
$m_{w,\text{let}}$	kg	Masa vode sadržane u letvicama
m_z	kg	Masa zraka u komori za sušenje
$n_{\text{pilj,sl}}$	-	Broj piljenica u jednom složaju
n_{sl}	-	Broj složaja u komori za sušenje
Nu	-	<i>Nusseltov</i> bezdimenzijski broj
n_{vent}	-	Broj ventilatora
P	m	Ukupna duljina vanjskih zidova koji odvajaju grijani prostor od vanjskog okoliša
p_{atm}	Pa	Atmosferski tlak
P_{komp}	W	Snaga kompresora
Pr	-	<i>Prandtlov</i> bezdimenzijski broj
$p_{ri,j}$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$p_{ri,sj}$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare u stanju zasićenja u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$q_{e,tri}$	J/kg	Specifični toplinski tok u i -toj zoni kondenzatora / isparivača sveden na vanjsku površinu
q_i	J/kg	Specifična entalpija radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
q_{isp}	J/kg	Specifična toplina predana u isparivaču
q_{kond}	J/kg	Specifična toplina predana u kondenzatoru
$q_{m,\text{RT}}$	kg/s	Maseni protok radne tvari
$q_{m,\text{sz}}$	kg/s	Maseni protok suhog zraka
$q_{m,\text{sz,ri,bj}}$	kg/s	Maseni protok suhog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja bukovih piljenica

$q_{m,sz,ri,h,j}$	kg/s	Maseni protok suhog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja hrastovih piljenica
$q_{m,sz,ri,j}$	kg/s	Maseni protok suhog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$q_{m,w,bukva}$	kg _w /s	Brzina sušenja u slučaju sušenja bukovih piljenica
$q_{m,w,hrast}$	kg _w /s	Brzina sušenja u slučaju sušenja hrastovih piljenica
$q_{m,zr}$	kg/s	Maseni protok vlažnog zraka
$q_{m,zr,ri,j}$	kg/s	Maseni protok vlažnog zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$q_{q,tri}$	J/kg	Specifični toplinski tok u i -toj zoni kondenzatora / isparivača sveden na unutarnju površinu
$Q_{st,bukva}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe tvari bukovih piljenica na temperaturu predgrijanja
$Q_{st,greda}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe tvari greda na temperaturu predgrijanja
$Q_{st,hrast}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe tvari hrastovih piljenica na temperaturu predgrijanja
$Q_{st,let}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe tvari letvicama na temperaturu predgrijanja
$q_{v,RT,i}$	m ³ /s	Volumenski protok radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
$q_{v,RT,j}$	m ³ /s	Volumenski protok radne tvari u j -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
$q_{v,zr}$	m ³ /s	Volumenski protok zraka u sušari
$Q_{w,bukva}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u bukovim piljenicama na temperaturu predgrijanja
$Q_{w,bukva}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u hrastovim piljenicama na temperaturu predgrijanja
$Q_{w,greda}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u gredama na temperaturu predgrijanja
$Q_{w,let}$	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u letvicama na temperaturu predgrijanja
Q_z	J	Toplinska energija potrebna za zagrijavanje zraka na temperaturu predgrijanja
R_0	(m ² K)/W	Specifični toplinski otpor uslijed onečišćenja na strani zraka
r_0	J/kg	Specifična toplina isparivanja vodene pare
Re	-	<i>Reynoldsov</i> bezdimenzijski broj
R_i	(m ² K)/W	Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari
R_t	(m ² K)/W	Toplinski otpor stijenke
s_1	m	Vertikalni razmak između cijevi
s_2	m	Horizontalni razmak između cijevi
s_d	m	Debljina piljenice
s_f	m	Razmak između lamela
$\check{s}_d$	m	Širina piljenice

δ_{sl}	m	Širina složaja
T_o	K	Temperatura dalje od stijenke
T_s	K	Temperatura stijenke
U	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline
$U_{equiv,k}$	W/(m ² K)	Ekvivalentni koeficijent prolaza topline prema tipologiji poda
V_{greda}	m ³	Volumen greda u komori za sušenje
V_{let}	m ³	Volumen letvica u komori za sušenje
V_{pilj}	m ³	Volumen jedne piljenice
$V_{pilj,sl}$	m ³	Volumen piljenica u jednom složaju
$V_{pilj,suš}$	m ³	Volumen svih piljenica u komori za sušenje
$\dot{V}_{sl,max}$	m ³ /s	Maksimalni volumenski protok zraka
V_z	m ³	Volumen zraka u komori za sušenje
$v_{zr,1}$	m ³ /kg	Specifični volumen vlažnog zraka na ulazu u isparivač
w	m/s	Brzina strujanja
w_f	m/s	Nastrujna brzina zraka
w_{pothl}	m/s	Brzina strujanja pothlađene kapljevine radne tvari
w_{preg}	m/s	Brzina strujanja pregrijane pare radne tvari
$w_{pretp,i}$	m/s	Pretpostavljena brzina strujanja radne tvari u i -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
$w_{stv,i}$	m/s	Stvarna brzina strujanja radne tvari u i -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
w_z	m/s	Brzina strujanja zraka
$w_{z,ij}$	m/s	Brzina strujanja zraka između i -te i j -te točke u komori za sušenje
$w_{z,max}$	m/s	Maksimalna brzina strujanja zraka u složaju
w_{zr}	m/s	Brzina strujanja zraka
X_{greda}	kg _w /kg _{st}	Početni sadržaj vlage greda
x_L	m	Razmak između letvica u uzdužnom smjeru
X_{let}	kg _w /kg _{st}	Početni sadržaj vlage letvica
X_{pilj}	kg _w /kg _{st}	Početni sadržaj vlage piljenica
$x_{ri,b,j}$	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja bukovih piljenica
$x_{ri,h,j}$	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja hrastovih piljenica
$x_{ri,j}$	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
x_s	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage vlažnog zraka u stanju zasićenja
x_{sl}	m	Vertikalni razmak između piljenica
x_{zr1}	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage zraka na ulazu u kondenzator / isparivač
x_{zr2}	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage zraka na izlazu iz kondenzatora / isparivača
x_{zrII}	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage vlažnog zraka na ulazu u zonu II isparivača

z	m	Dubina konstrukcije ispod razine tla
α	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline
$\alpha_{R,i}$	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
α_u	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane stijenke
α_v	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane stijenke
α_{zr}	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka
$\alpha_{zr,i}$	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka sveden na unutarnju površinu cijevi
$\alpha_{zr,w}$	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka kada se uzme u obzir i ovlaženje stijenke isparivača
β	-	Omjer vanjske i unutrašnje površine izmjenjivača
δ	m	Debljina stijenke cijevi
δ_i	m	Debljina i -tog sloja stijenke
Δp_{uk}	Pa	Ukupni pad tlaka
Δp_{zr}	Pa	Pad tlaka zraka
$\Delta \vartheta_{m,j}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika u j -toj zoni izmjenjivača topline
$\Delta \vartheta_{m,i}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika isparavanja
$\Delta \vartheta_{m,k}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika kondenzacije
$\Delta \vartheta_{po}$	°C	Pothlađenje radne tvari
$\Delta \vartheta_{pr}$	°C	Pregrijanje radne tvari
ε_{hl}	-	Faktor hlađenja
η_{iz}	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
ϑ_i	°C	Temperatura isparivanja
ϑ_k	°C	Temperatura kondenzacije
$\vartheta_{m,i}$	°C	Srednja temperatura zraka prilikom isparavanja
$\vartheta_{m,k}$	°C	Srednja temperatura zraka tijekom kondenzacije
$\vartheta_{m,reg}$	°C	Srednja temperatura predgrijanja
$\vartheta_{m,u}$	°C	Srednja temperature između unutarnje temperature i temperature stijenke
$\vartheta_{m,v}$	°C	Srednja temperatura između vanjske temperature i temperature stijenke
$\vartheta_{m,v,god}$	°C	Srednja godišnja temperatura zraka
ϑ_{pothl}	°C	Temperatura na izlazu iz kondenzatora
ϑ_{preg}	°C	Temperatura pregrijanja
$\vartheta_{ri,b,j}$	°C	Temperatura zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja bukovih piljenica
$\vartheta_{ri,h,j}$	°C	Temperatura zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka za slučaj sušenja hrastovih piljenica
$\vartheta_{ri,j}$	°C	Temperatura zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
ϑ_s	°C	Temperatura stijenke

ϑ_s	°C	Temperatura vlažnog zraka u stanju zasićenja
$\vartheta_{\text{temp,pilj}}$	°C	Temperatura temperiranja piljenica
$\vartheta_{u,\text{predgr}}$	°C	Temperatura predgrijanja kontejnera
ϑ_v	°C	Vanjska projekta temperatura
ϑ_{zr1}	°C	Temperatura zraka na ulazu u kondenzator / isparivač
ϑ_{zr2}	°C	Temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora / isparivača
ϑ_{zri}	°C	Temperatura zraka na ulazu / izlazu iz i -te zone izmjenjivača topline
λ	W/(m K)	Toplinska provodnost
λ_{AL}	W/(m K)	Toplinska provodnost aluminija
λ_{CU}	W/(m K)	Toplinska provodnost bakra
λ_i	W/(m K)	Toplinska provodnost i -tog sloja stijenke
λ_j	W/(m K)	Toplinska provodnost radne tvari u j -toj zoni izmjene topline
λ_{szp}	W/(m K)	Toplinska provodnost suhozasićene pare radne tvari
λ_{vk}	W/(m K)	Toplinska provodnost vrele kapljevine radne tvari
λ_{zr}	W/(m K)	Toplinska provodnost zraka
μ	Pa s	Dinamička viskoznost
ν_i	m ² /s	Kinematička viskoznost radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
ν_s	m ² /s	Kinematička viskoznost pri temperaturi stijenke
ν_{szp}	m ² /s	Kinematička viskoznost suhozasićene pare radne tvari
ν_{vk}	m ² /s	Kinematička viskoznost vrele kapljevine radne tvari
ν_{zr}	m ² /s	Kinematička viskoznost zraka
ζ_w	-	Koeficijent utjecaja ovlaženja stijenke isparivača prilikom izmjene topline
ρ	kg/ m ³	Gustoća
ρ_{bukva}	kg/m ³	Gustoća bukovih piljenica
ρ_{hrast}	kg/m ³	Gustoća hrastovih piljenica
ρ_i	kg/m ³	Gustoća radne tvari u i -toj zoni izmjene topline
ρ_{jela}	kg/m ³	Gustoća greda i letvica
$\rho_{ri,j}$	kg/m ³	Gustoća zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$\rho_{RT,i}$	kg/m ³	Gustoća radne tvari u i -toj karakterističnoj točki procesa dizalice topline
ρ_{szp}	kg/m ³	Gustoća suhozasićene pare radne tvari
ρ_{vk}	kg/m ³	Gustoća vrele kapljevine radne tvari
ρ_z	kg/m ³	Gustoća zraka
$\Phi_{GR,ri,b}$	W	Potrebna snaga kondenzatora u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja bukovih piljenica
$\Phi_{GR,ri,h}$	W	Potrebna snaga kondenzatora u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja hrastovih piljenica

$\Phi_{HL,ri,b}$	W	Potrebna snaga isparivača u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja bukovih piljenica
$\Phi_{HL,ri,b}$	W	Potrebna snaga isparivača u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja hrastovih piljenica
Φ_{isp}	W	Snaga isparivača dizalice topline
Φ_{kond}	W	Snaga kondenzatora dizalice topline
Φ_{lat}	W	Toplinski tok kondenzacija / isparavanja radne tvari
Φ_{pothl}	W	Toplinski tok pothlađenja radne tvari
$\Phi_{predgrijanja}$	W	Potrebna snaga predgrijanja
$\Phi_{predgrijanja,bukva}$	W	Potrebna snaga predgrijanja u slučaju sušenja bukovih piljenica
$\Phi_{predgrijanja,hrast}$	W	Potrebna snaga predgrijanja u slučaju sušenja hrastovih piljenica
Φ_{preg}	W	Toplinski tok pregrijanja radne tvari
$\varphi_{ri,j}$	-	Relativna vlažnost zraka u i -toj radnoj točki pri j -tom stanju zraka
$\Phi_{T,krov,zid}$	W	Transmisijski gubici topline kroz krov i kroz zidove komore za sušenje
$\Phi_{T,pod}$	W	Transmisijski gubici topline kroz pod komore za sušenje
$\Phi_{T,uk}$	W	Ukupni transmisijski gubici topline
$\Phi_{T,uk,ri,b}$	W	Ukupni toplinski gubici u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja bukovih piljenica
$\Phi_{T,uk,ri,h}$	W	Ukupni toplinski gubici u i -toj radnoj točki za slučaj sušenja hrastovih piljenica

SAŽETAK

U okviru ovog diplomskog rada prikazano je projektno rješenje kontejnerske kondenzacijske sušare za sušenje piljenog drva bukve i hrasta. Kontejner u kojem se treba smjestiti prostor za sušenje i strojarnica je brodski kontejner visoke izvedbe standardne veličine 40 stopa. Kondenzacijska sušara kao glavni izvor topline koristi dizalicu topline zrak-zrak koja kao izvor topline koristi latentnu toplinu kondenzacije vlage sadržane u struji zraka. Kao radna tvar u dizalici topline koristi se R134a. Uz glavni izvor topline potreban je i pomoćni, kako bi se proces sušenja pokrenuo. Diplomski rad sastoji se od teorijske osnove i proračunskog dijela. U sklopu teorijske osnove definira se: struktura drva, vlaga u drvu, kinetika sušenja drva i moguće greške prilikom sušenja. Također je dan opći opis konvektivnog sušenja uključujući i opis kondenzacijskog sušenja drva. U sklopu proračunskog dijela određuju se: oblik i dimenzije složaja, potreban broj ventilatora za strujanje zraka i potrebna snaga pomoćnog izvora topline (predgrijača). Isto tako, određene su potrebne snage isparivača i kondenzatora dizalice topline zrak-zrak za tri radne točke prema odabranom režimu sušenja. Na temelju izračunatih potrebnih snaga isparivača i kondenzatora dimenzionirani su: kompresor dizalice topline, cjevovodi dizalice topline, isparivač i kondenzator dizalice topline. Na kraju rada prikazan je dispozicijski crtež kontejnerske kondenzacijske sušare.

Ključne riječi: sušenje piljenog drva, kondenzacijska sušara piljenog drva, dizalica topline zrak-zrak, vlažni zrak

SUMMARY

Within this master's thesis, the project solution of the container dehumidification dryer for drying sawn beech and oak wood is presented. The container in which the drying area and the technical room should be located is a standard size high cube 40 feet shipping container. The dehumidification dryer uses an air-to-air heat pump as the main heat source, which uses the latent heat of condensed moisture contained in the air current as its heat source. R134a is used as a refrigerant in the heat pump. In addition to the main heat source, an auxiliary one is needed, to start the drying process. The master's thesis consists of a theoretical part and the design part. Within the theoretical part, the following terms are defined: wood structure, wood moisture, wood drying kinetics and possible drying errors. A general description of convection drying was also given, including a description of dehumidification drying of wood. Within the design part of the thesis, the following is determined: the shape and dimensions of the wood stack, the required number of fans and the required power of the auxiliary heat source (preheater). Likewise, the necessary thermal capacity of air-to-air heat pump evaporator and condenser for three operating points according to the selected drying regime are determined. Based on the calculated required capacity of evaporator and condenser, the following parts are dimensioned: heat pump compressor, heat pump pipelines, evaporator, and heat pump condenser. At the end of the thesis, a dispositional drawing of a container dehumidification dryer is presented.

Key words: sawn wood drying, dehumidification dryer of sawn wood, air-to-air heat pump, moist air

1. UVOD

Sušenje (ili dehidracija) je proces kojim se iz tvari uklanja kapljevina (na primjer voda) kako bi se dobio proizvod u čvrstom i suhom stanju [1][2]. Sušenje podrazumijeva korištenje toplinske energije kako bi se pomoću procesa ishlapljivanja iz vlažnog materijala uklonila vlaga. Poseban oblik sušenja je sušenje zamrzavanjem, koje se odvija ispod trojne točke vode koje se uklanja, što znači da voda sadržana u vlažnom materijalu koja se prvo smrzнула, sublimira te prelazi iz čvrste faze izravno u paru [2]. Iznescena definicija sušenja isključuje mehaničke metode sušenja kao što su filtracija, centrifugiranje, sedimentacija te korištenje molekularnih sita [2]. Kada se vlažna tvar podvrgne sušenju, istovremeno se odvijaju dva procesa. Prvi proces je prijenos toplinske energije s okoliša na tvar radi ishlapljivanja površinske vlage. Toplinska energija se u ovom procesu može prenositi na sva tri načina, to jest, provođenjem (indirektni sušionici, dovođenje topline kroz zagrijanu plohu), konvekcijom (direktni sušionici, toplina se vlažnoj tvari dovodi pomoću radnog plina koji istovremeno na sebe preuzima i odnosi ishlapljenu vlagu) te zračenjem (mikrovalni i dielektrični sušionici, materijal se suši postavljanjem u visokofrekventno elektromagnetsko polje). Drugi proces je prijenos unutrašnje vlage prema površini te njezino ishlapljivanje uslijed djelovanja prvog procesa [2].

Sušenje je jedan od najstarijih i najvažnijih postupaka u procesnoj tehnici te se koristi u kemijskoj industriji, drvenoj industriji, biotehnologiji, preradi polimera i drugima. Neki od ciljeva sušenja su: povećanje postojanosti proizvoda prilikom korištenja i dugog skladištenja, lakša manipulacija proizvodom te manji troškovi transporta proizvoda. Sušenje je jedan od energetski najzahtjevnijih i najintezivnijih procesa zbog visoke latentne topline ishlapljivanja vode te niskog stupnja iskoristivosti konvencionalnih konvektivnih sušara koje koriste vrući zrak kao radni medij. Prema novijim podacima potrošnja energija na sušenje u industriji iznosi 10-15% ukupne potrošnje energije u Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Francuskoj i Ujedinjenom Kraljevstvu te 20-25% ukupne potrošnje energije u Njemačkoj i Danskoj[2]. Iz ovih podataka se može zaključiti da dominantni trošak industrijskih sušara nije vezan uz početno ulaganje već je vezan uz troškove pogona. Nepravilno vođenje procesa sušenja može dovesti do nepovratne štete na kvaliteti proizvoda. Sušenje je komplicirani proces koji uključuje prijenos topline i mase te kemijske i fizičke promjene tvari zbog kojih može doći do značajne promjene tvari tijekom sušenja. Fizičke promjene koje mogu nastati su stezanje, bubrenje,

kristalizacija i slične. U nekim slučajevima može doći i do kemijskih i biokemijskih promjena tvari koje se mogu manifestirati kao promjene u boji, teksturi, mirisu ili nekim drugim složenim svojstvima proizvoda. Kako bi se procesom sušenja poboljšala kvaliteta proizvoda ili barem očuvala izbjegavanjem nepoželjnih fizičkih i kemijskih promjena, potrebno je kvalitetno voditi proces sušenja. Za kvalitetno vođenje procesa potrebno je poznavati utjecaj parametara sušenja poput temperature sušenja, brzine sušenja i sličnih na proces sušenja to jest na materijal koji se suši [2].

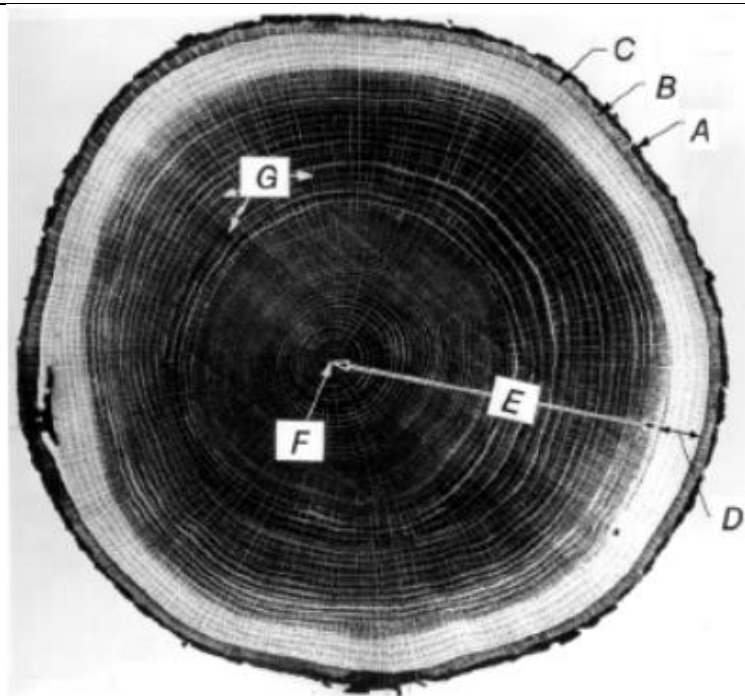
2. SUŠENJE U DRVNOJ INDUSTRIJI

Tijekom procesa obrade drva proces sušenja drvne građe je energetski najzahtjevniji i najintenzivniji. Nadalje, proces sušenja je vrlo bitan zato što utječe na kvalitetu građe te posljedično i na krajnju cijenu koju proizvođač može postići. Cilj sušenja drvne građe je ravnomjerno postizanje ravnotežne vlažnosti po presjeku piljenice te poboljšanje ili barem održavanje kvalitete drva. Iznos ravnotežne vlažnosti je uvjetovan klimatskim uvjetima u kojima će se građa koristiti ili postupcima obrade kojima će se građa podvrgnuti [3].

2.1. Struktura drva

Na poprečnom presjeku debla, gledano izvana prema unutra, mogu se razaznati različiti slojevi drva: vanjska kora, unutarnja kora, kambij, bjelika, srž, te srčika. Vanjska kora je skup mrtvih stanica koji služi kao zaštitni sloj unutrašnjim slojevima drva te sprječava živo drvo od isušivanja dok se unutarnja kora sastoji od živih stanica čija je funkcija prijenos vode i hranjivih tvari. Prilikom obrade drva i njegovog rezanja u piljenice kora drva se skida tako da ona nema utjecaja na proces sušenja [3]. Između unutarnje kore i bjelike nalazi se kambij koji se sastoji od jednog sloja stanica, a njegova glavna uloga je stvaranje novih stanica. Nove stanice drva se stvaraju na unutarnjoj strani kambija a nove stanice kore na vanjskoj strani kambija. Izvan kambija nema stvaranja novih stanice, te je rast drva određen samo njegovom aktivnošću [4].

Bjelika je najmlađi dio drva, debljine 10-50 mm (ovisno o vrsti drva, te visini na kojoj je napravljen poprečni presjek) te u pravilu sadrži aktivne žive stanice. Stanice bjelike sudjeluju u prijenosu hranjivih tvari i vode, te su zato u pravilu potpuno zasićene vodom. Daljnjim rastom drva stanice bjelike bliže srčiki polako postaju stanice srži. Takve stanice postaju neaktivne te prestaju sudjelovati u prijenosu vode. Prijelazom stanica iz bjelike u srž dolazi do povećanja udjela ekstrakтива, te pošto ove stanice više ne sudjeluju u prijenosu vode, dolazi do smanjenja sadržaja vlage. Zbog manjeg sadržaja vlage, srž je otpornija od bjelike na biološku degradaciju, te je iz srži procesom sušenja puno teže izvući vlagu [3].



Slika 1. Poprečni presjek debla (A-vanjska kora, B- unutarnja kora, C- kambij, D- bjelika, E- srž, F- srčika, G- godovi) [4]

2.2. Vлага u drvu

Tek srušeno svježe drvo ima vrlo visoki sadržaj vlage zato što je drvo porozan i higroskopan materijal (higroskopni materijali su materijali koji preuzimaju vlagu iz okoliša) [3]. Sadržaj vlage svježeg drva može iznositi od 30% do čak preko 200%, međutim pošto je drvo prirodan materijal postoji velika raznolikost u sadržaju vlage između različitih trupaca (čak i ako su trupci od iste vrste drva) [4][5]. Vлага utječe na mnoga svojstva drva poput čvrstoće, mase, tvrdoće, otpornost na trošenje, izolacijska svojstva, dimenzijsku stabilnosti i biološku stabilnost (otpornost na truljenje, gljivice i kukce). Kako bi se ova svojstva poboljšala i učinila stabilnijima, potrebno je smanjiti udio vlage u piljenicama [3].

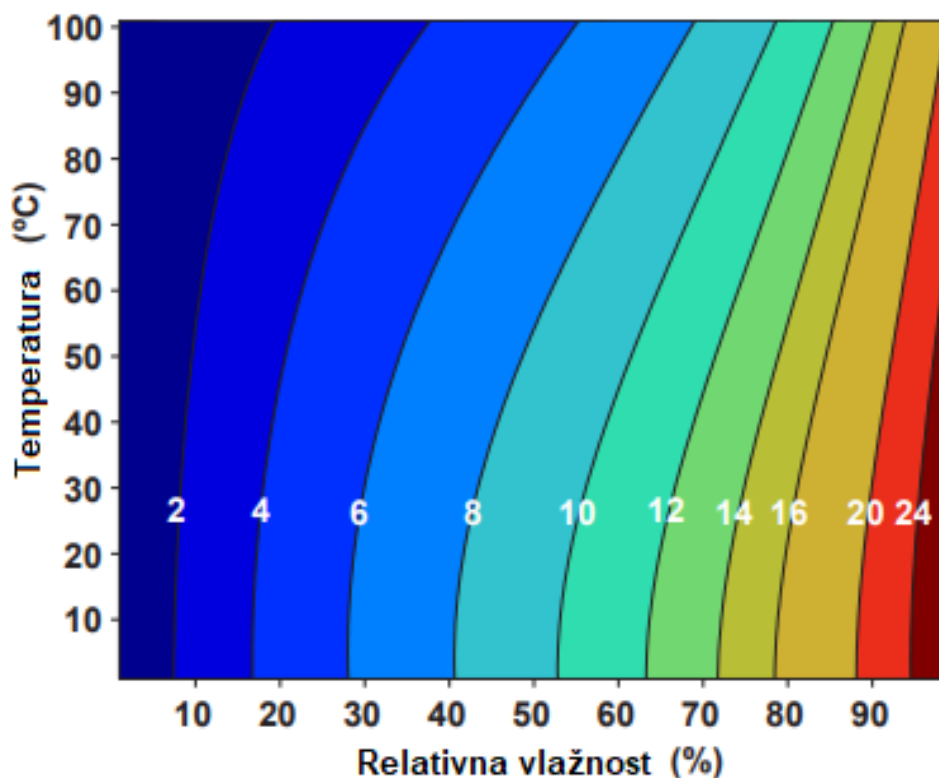
Vлага koja se nalazi u drvu se dijeli na slobodnu i vezanu vlagu. Slobodna vлага je nevezana vлага koja se nalazi u staničnim šupljinama i porama, lako se uklanja te su joj svojstva (gustoća, viskoznost, tlak zasićenja) vrlo slična kapljevitoj vodi. Međutim, na ovu vlagu djeluju kapilarne sile te treba dovesti dovoljno energije kako bi se one nadvladale. Uklanjanjem slobodne vlage se drvu samo smanjuje masa te u pravilu ne dolazi do promjene ostalih svojstava i do dimenzijskih promjena to jest stezanja drva [3]. Vezana vлага se odnosi na vodu koja se nalazi u šupljinama staničnih stijenki, a za stijenku je vezana vodikovim vezama. Vezanu vlagu je teže ukloniti od slobodne vlage to jest potrebno je dovesti veću količinu energije. Prilikom

uklanjanja vezane vode dolazi do stezanja drva te do značajne promjene dimenzija i fizikalnih svojstava [3][6].

Tijekom procesa sušenja dolazi prvo do uklanjanja slobodne vode pošto za njezino uklanjanje treba manja količina energije. Sadržaj vlage pri kojem nema slobodne vlage u straničnim šupljinama i porama, a šupljine u staničnoj stijenci su zasićene vlagom, naziva se točka zasićenja vlakanaca drva. Ako se zanemari efekt kapilarne kondenzacije u porama koje su manje od $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ekvivalentnog promjera, točka zasićenja vlakanaca drva se može definirati kao ravnotežna vlažnost u okolišu čija relativna vlažnost iznosi 99% [4]. Pošto količina vlage po presjeku piljenice nije konstantna, nije moguće definirati točku zasićenja vlakanaca za cijelu piljenicu već samo za određene regije piljenice, međutim u praksi se uzima da se točka zasićenja vlakanaca na sobnoj temperaturi nalazi na sadržaju vlage između 25-35% ovisno o vrsti drveta. Sadržaj vlage pri kojem dolazi do zasićenja vlakanaca drva opada s porastom temperature. Točka zasićenja vlakanaca predstavlja sadržaj vlage ispod kojeg daljnjim sušenjem dolazi do stezanja drva uslijed početka uklanjanja vode iz staničnih stijenci. Stezanje drva uzrokuje povećanje čvrstoće, tvrdoće i krutosti. Ispod točke zasićenja vlakanaca dolazi do smanjenja brzine sušenja te je potrebna veća količina energije kako bi se svladale vodikove veze između vode i stanične stijenske [3].

Zbog svojstva higroskopnosti vlažno drvo izloženo zraku konstantne temperature će nakon određenog vremena prilagoditi svoj sadržaj vlage sadržaju vlage u zraku, to jest parcijalni tlak vlage u drvu će se izjednačiti s parcijalnim tlakom vlage u zraku. Sadržaj vlage drva pri kojem je parcijalni tlak vlage u drvu jednak parcijalnom tlaku vlage u zraku se naziva ravnotežni sadržaj vlage. Kako bi se nakon sušenja i obrade piljenice zadržale željene dimenzije i svojstva proizvoda, proizvod treba osušiti što bliže ravnotežom sadržaju vlage, koji ovisi o stanju okoliša u kojem će se piljenica koristiti. Ravnotežni sadržaj vlage najviše ovisi o relativnoj vlažnosti i temperaturi okoliša, te je više osjetljiv na promjenu u relativnoj vlažnosti. Na primjer, pri konstantnoj relativnoj vlažnosti okolišnog zraka od 55%, povećanjem temperature okolišnog zraka s 21°C na 85°C , ravnotežni sadržaj vlage se promijeni sa 10,5% na 6,4%, a ako temperaturu okolišnog zraka držimo konstantnom na 49°C , te mijenjamo relativnu vlažnost okolišnog zraka s 20% na 80%, ravnotežni sadržaj vlage se promijeni s 4% na 14,1%. Ostali utjecajni faktori poput mehaničkih naprezanja u drvu, kemijskog sastava, strukture drva i gustoće se u praksi zanemaruju. Ravnotežni sadržaj vlage vrlo malo ovisi o vrsti drva koje se suši, pa tako na primjer, ispitivanjem 15 različitih vrsta četinjača pri okolišnoj temperaturi od

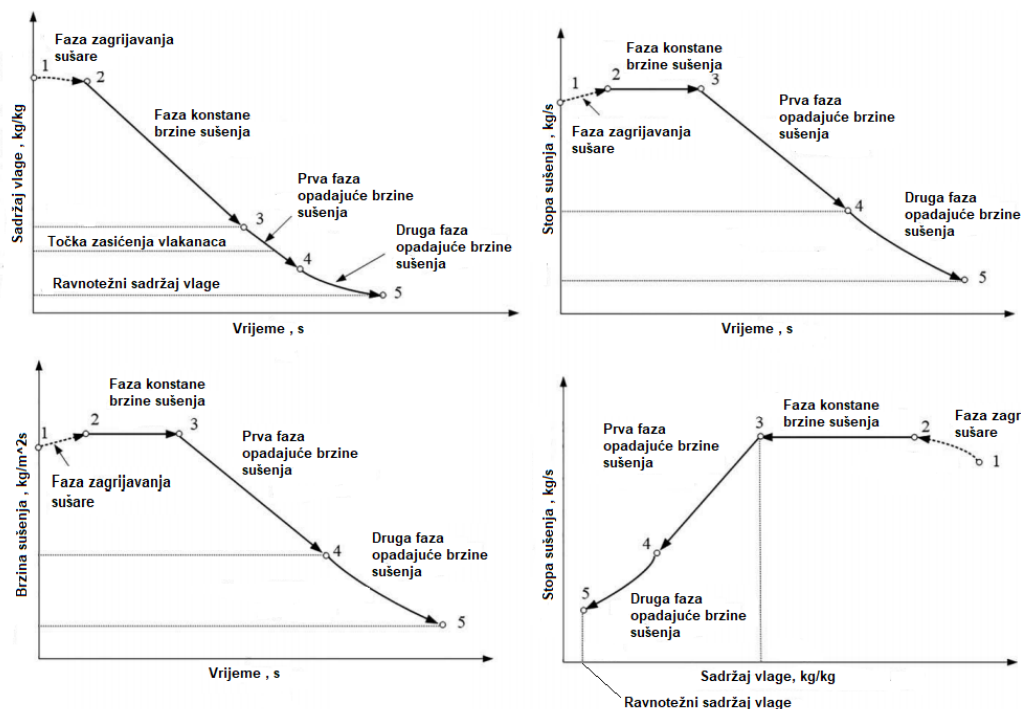
26°C i relativnoj vlažnosti od 65%, dobili su se ravnotežni sadržaji vlage u rasponu od 10,7% do 13,5% [3].



Slika 2. Prikaz ravnotežne vlažnosti u funkciji temperature i relativne vlažnosti [5]

2.3. Kinetika sušenja drva

Kinetika procesa sušenja se promatra prema brzini sušenja koja se definira kao masa vlage koja se odvede s jedinične površine čvrstog materijala (u našem slučaju drva) u jedinici vremena. Sušenje higroskopskih materijala u pravilu se može podijeliti u tri glavne faze i pripremnu fazu zagrijavanja materijala i sušare. Tri glavne faze se razlikuju prema dominantnim mehanizmima prijenosa topline i mase.



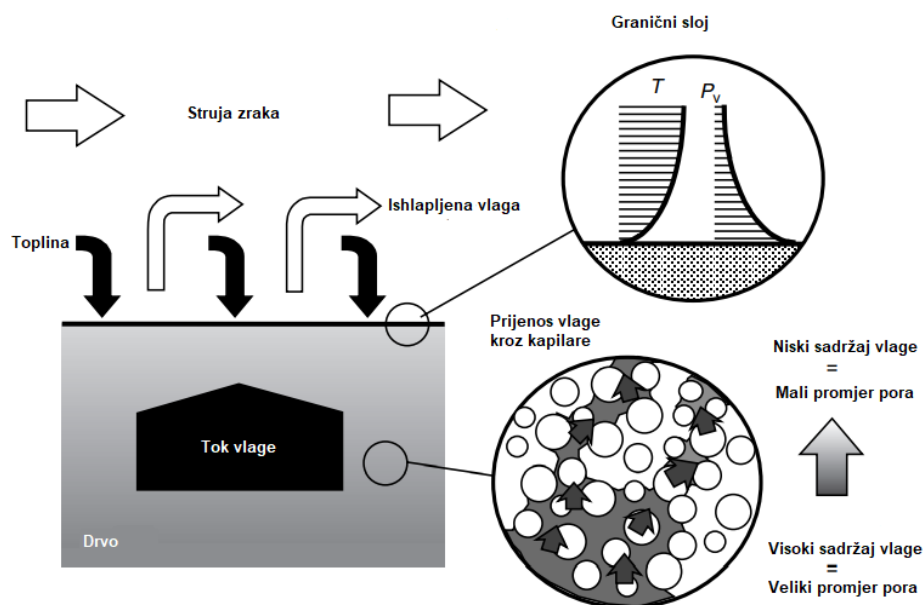
Slika 3. Grafovi kinetike sušenja u ovisnosti o raznim veličinama [3]

Za vrijeme pripremne faze zagrijavanja (točke 1-2 na slici 2.), piljenice u sušari se zagrijavaju dok se ne postigne ravnoteža između radnog medija (zraka) i piljenica, to jest dok se površinska temperatura piljenice ne izjednači s temperaturom vlažnog termometra radnog medija. U ovoj fazi ne dolazi do značajnog smanjenja sadržaja vlage. Prva glavna faza (točke 2-3 na slici 2.) naziva se faza konstantne brzine sušenja, prijenos vlage se odvija kroz kapilare a toplina se prenosi konvekcijom unutar graničnog sloja. Nakon prve faze nastupa prva faza opadajuće brzine sušenja (točke 3-4 na slici 2.), u ovoj fazi se prijenos vlage odvija kombinacijom prijenosa kroz kapilare i difuzije a prijenos topline kombinacijom konvekcije i kondukcije. Zadnja faza se naziva druga faza opadajuće brzine sušenja (točke 4-5 na slici 2.), u ovoj fazi prijenos vlage odvija se samo difuzijom a prijenos topline se odvija samo kondukcijom [3].

2.3.1. Faza konstantne brzine sušenja

Nakon pripremne faze zagrijavanja sušare i piljenica nastupa faza u kojoj je brzina sušenja piljenica konstantna. U ovoj fazi površina piljenica je zasićena vlagom i prekrivena tankim slojem vode. Vлага se s površine odvodi ishlapljivanjem, dok se površina održava vlažnom pomoću slobodne vlage koja se na površinu prenosi kroz kapilare. Sva toplina dovedena radnim medijem se troši na latentnu toplinu ishlapljivanja, a pošto nema drugih toplinskih tokova, temperatura piljenice se ustali na temperaturi vlažnog termometra koja odgovara stanju radnog medija. Brzina sušenja ovisna je samo o vanjskim parametrima to jest o stanju radnog medija (temperatura, relativna vlažnost te brzina strujanja). Brzina sušenja se može povećati

povećanjem temperature radnog medija, povećanjem brzine strujanja radnog medija ili smanjenjem relativne vlažnosti radnog medija. Međutim, dok brzina sušenja ovisi o vanjskim parametrima, duljina trajanja faze konstantne brzine sušenja ovisi o unutarnjim parametrima to jest o tome koliko se brzo vlaga prenosi iz daljnjih slojeva drva prema površinskim slojevima [3].



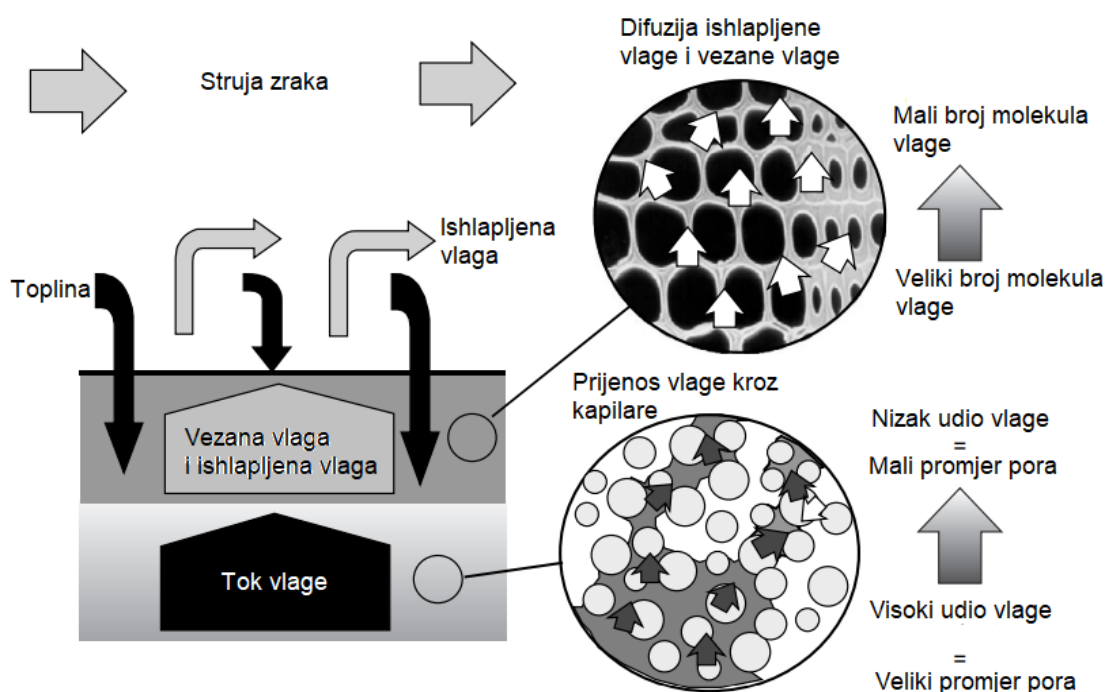
Slika 4. Shema prijenosa mase i energije tijekom faze konstantne brzine sušenja [2]

2.3.2. Prva faza opadajuće brzine sušenja

Nakon faze konstantne brzine sušenja nastupa prva faza opadajuće brzine sušenja koja počinje kada se na površini drva počnu pojavljivati suhi predjeli. U ovoj fazi površina piljenice više nije zasićena vodom, zato što se ishlapljivanje vlage s površine odvija brže od prijenosa slobodne vlage iz daljnjih slojeva piljenice na površinu. Zbog isušivanja površine manji dio topline se troši na ishlapljivanje te se višak topline troši na zagrijavanje površine čija temperatura postepeno raste od temperature vlažnog termometra prema temperaturi suhog termometra za stanje zraka u sušari. Toplina se na površinu prenosi konvekcijom a u daljnje slojeve kondukcijom. Zbog kombinacije većeg otpora prijenosa topline kondukcijom i većeg otpora prijenosa vlage unutar piljenice dolazi do opadanja brzine sušenja. Kako se površina piljenice sve više isušuje, brzina sušenja sve manje ovisi o vanjskim parametrima, to jest o stanju i brzini zraka u sušari, a sve više ovisi o unutarnjim parametrima, to jest o difuziji vlage unutar piljenice te kondukciji topline kroz piljenicu [3].

2.3.3. Druga faza opadajuće brzine sušenja

Druga faza opadajuće brzine sušenja započinje kada se površina piljenice potpuno osuši to jest kad je parcijalni tlak vodene pare u cijeloj piljenici manji od parcijalnog tlaka zasićenja. Prijenos topline s radnog medija na piljenicu sve je manji zbog male razlike u temperaturama. Unutar piljenice se stvara fronta vlage te se ishlapljivanje djelomično seli u unutrašnjost piljenice. Iznad fronte vlage se ishlapljena vlaga i vezana vlaga difuzijom prenose na površinu piljenice gdje vezana vlaga ishlapljuje. Toplina potrebna za ishlapljivanje unutar piljenice se prenosi kondukcijom. Opadanjem sadržaja vlage fronta vlage se seli sve dublje u piljenicu te je otpor kondukciji topline posljedično sve veći. Istovremeno zbog smanjenja sadržaja vlage unutar piljenice povećava se otpor prijenosa vlage, a brzina sušenja se ubrzano smanjuje. Brzina sušenja u ovoj fazi više ne ovisi o vanjskim parametrima, prije čemu je ograničavajući faktor difuzija vlage kod vrsta drva koja imaju veliku gustoću i male pore, dok je kod vrsta koja imaju malu gustoću i velike pore ograničavajući faktor kondukcija topline. Nakon što se fronta vlage potpuno povuče, cijeli volumen piljenice je ispod točke zasićenja vlakanaca drva te se prijenos vlage nastavlja samo difuzijom vezane vlage. Druga faza opadajuće brzine sušenja traje dok se ne uspostavi ravnotežni sadržaj vlage određen stanjem radnog medija u sušari [3].



Slika 5. Shema prijenosa mase i energije tijekom druge faze opadajuće brzine sušenja [2]

2.4. Moguće greške sušenja

Ekonomski gledano sušenje je jedan od najbitnijih procesa u preradi drva, pa se tako kvalitetnim procesom sušenja vrijednost piljenica može višestruko povećati, međutim ako je proces sušenja loše proveden, trošak štete može premašiti sve ostale troškove vezane uz sušenje drva. Glavni uzroci grešaka pri sušenju su velika neravnomjernost sadržaja vlage po piljenici te zaostala naprezanja uzrokovana sušenjem. Greške se najčešće manifestiraju kao pukotine, izvijanje, zakoravanje ili promjena boje. Pukotine i zakoravanje u pravilu nastaju prebrzim sušenjem (previsoka temperatura i/ili brzina strujanja zraka te preniska relativna vlažnost radnog medija) dok zbog presporog sušenja (preniska temperatura i/ili brzina sušenja te previsoka relativna vlažnost radnog medija) dolazi do propagacije već nastalih pukotina te do promjene boje i pojave izvijanja. Prilikom sušenja drva, stezanje je glavni faktor nastanka naprezanja, a ako iznos naprezanja postane veći od čvrstoće drva, dolazi do pucanja. Kao što je već navedeno, stezanje drva nastupa kad počne ishlapljivati vlaga koja je vezana unutar stanične stijenke, odnosno kada određeni dio drva dostigne točku zasićenja vlaknaca. Ako neki dio piljenice postigne točku zasićenja vlaknaca prije negoli ostali, prije će se početi stezati i tada dolazi do nastanka nepovoljne raspodjele naprezanja. Na primjer, u konvektivnim sušarama je česti problem da vanjski sloj piljenice brže postigne točku zasićenja vlaknaca od unutarnjeg sloja uslijed čega dolazi do naprezanja između dva sloja. Ipak treba naglasiti kako se većina grešaka može izbjeći pažljivim odabirom režima sušenja te kvalitetnim vođenjem procesa. Kako bi se mogao odabrati najbolji režim sušenja bitno je dobro pregledati piljenice za moguće urođene greške te pratiti njihov sadržaj vlage u cijelom postupku sušenja [3].

2.4.1. Pukotine

Pukotine nastaju kada je naprezanje nastalo uslijed stezanja drva veće od njegove čvrstoće. Čestim izmjenama režima između zraka visoke relativne vlažnosti i zraka niske relativne vlažnosti može doći do propagacije pukotina i do ozbiljnih oštećenja. Površinske pukotine najčešće nastaju kod sušenja bočnica sa zrakom preniske relativne vlažnosti ili prevelike brzine strujanja. Površinske pukotine na bočnicama postaju vidljive prilikom blanjanja drva. Ako je drvo bilo izloženo bakterijskim ili gljivičnim infekcijama veća je šansa da će prilikom sušenja doći do površinskih pukotina. Čeone pukotine nastaju radi vrlo brzog uzdužnog prijenosa vlage zbog kojeg dolazi do brzog isušivanja krajeva piljenica. Zbog brzog isušivanja krajeva piljenice dolazi do nastanka jakih naprezanja te posljedično do nastanka pukotina. Čeone pukotine često nastaju čak i prije sušenja. Kako bi se nakon rezanja trupaca u piljenice izbjeglo njihovo

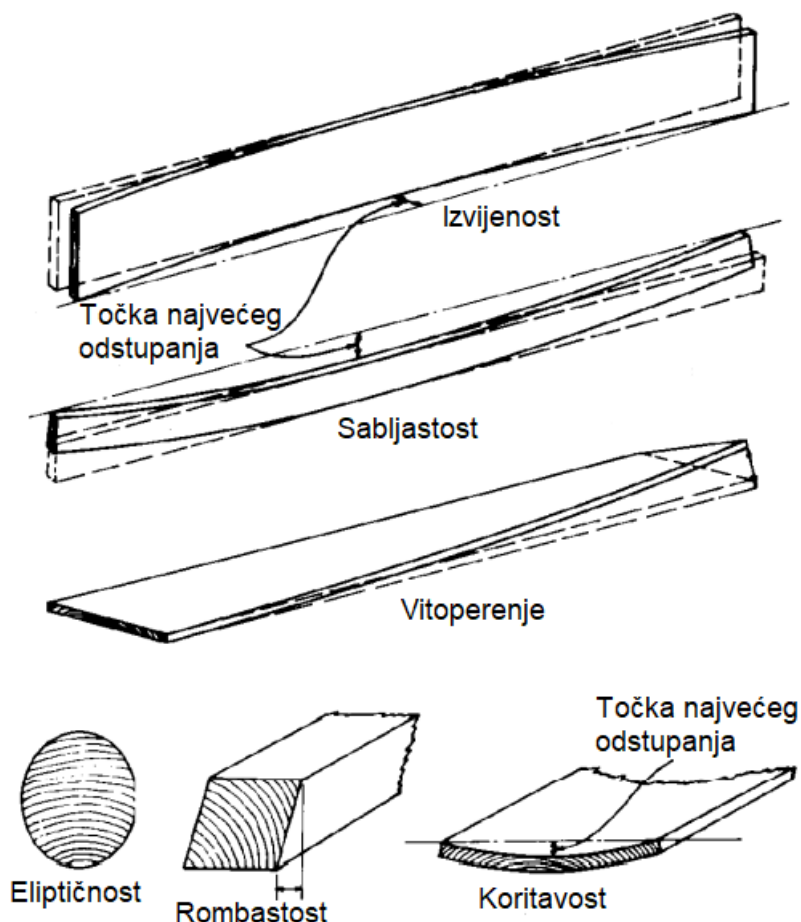
nastajanje potrebno je zaštititi krajeve piljenica koja se vrši pomoću raznih premaza (poput voštanih premaza) te ovlaživanjem krajeva piljenice vodom. Ako dođe do nastanka pukotina potrebno je smanjiti brzinu sušenja kako bi se spriječila njihova propagacija [3].



Slika 6. Čeone pukotine [4]

2.4.2. *Izvijanje (promjena oblika piljene građe)*

Izvijanje se može definirati kao odstupanje bilo koje površine piljenice od ravnosti. Do izvijanja dolazi zbog neravnomjernog stezanja u radijalnog, uzdužnom ili poprečnom smjeru te zbog zaostalih naprezanja koja nastaju prilikom rasta drva. Loše slaganje u složaje, postojanje juvenilnog i reakcijskog drveta te sušenja pri velikim relativnim vlažnosti mogu potaknuti nastanak izvijanja. Izvijanje se može djelomično spriječiti sušenjem pod opterećenjem. Glavni oblici izvijanja su izvijenost, sabljastost, vitoperenje, eliptičnost, rombastost te koritavost [3][4].



Slika 7. Primjeri mogućih oblika izvijanja [4]

2.4.3. Zakoravanje

Zakoravanje je vrlo česta greška u konvektivnim sušarama koja nastaje kada uslijed prevelike brzine sušenja dolazi do prebrzog isušivanja površine. Zbog toga se vanjski dio piljenice želi stegnuti ali ga još uvijek mokra unutrašnjost u tome sprječava. Vanjski dio piljenice je u ovom slučaju opterećen na vlak dok je unutrašnji dio piljenice opterećen na tlak. Jednom kada dođe do zakoravanja površine potrebno je prijeći na blaži režim sušenja čime se trajanje sušenja i utrošak energije povećavaju. Zakoravanje može predstavljati veliki problem kada se piljenice nakon sušenja trebaju dodatno obrađivati, zato što piljenjem ili profiliranjem piljenica dolazi do oslobađanja naprezanja te posljedično do izvijanja. Obrnuto zakoravanje se može dogoditi u kasnijim periodima sušenja ako dođe do brzog zagrijavanja piljenica pri velikoj relativnoj vlažnosti radnog medija. U ovom slučaju se vanjski sloj piljenice uslijed visoke relativne vlažnosti i temperature širi više nego unutarnji sloj te dolazi do plastične deformacije drvnih vlakana u vanjskom sloju. Smanjenjem relativne vlažnosti dolazi do većeg stezanja unutrašnjeg

sloja naspram vanjskog (zbog plastične deformacije vanjskog sloja) te do nastanka unutarnjih pukotina [3].



Slika 8. Prikaz ispitivanja uzorka na zakoravanje [7]

2.4.4. Promjena boje

Promjene boje predstavljaju veliki problem prilikom sušenja pogotovo ako se radi o skupljim vrstama drva koja se koriste za dekorativne elemente poput namještaja. Promjene boje mogu biti izazvane kemijskim putem te uslijed djelovanja gljivica. Kemijski uzrokovana promjena boje je posljedica enzimskih i oksidacijskih reakcija spojeva u drvu. Kemijski uzrokovane promjene boje očituju se u mnogim obojenostima, a najčešća je smeđa obojenost. Ona je posljedica previsoke temperature sušenja te se izbjegava smanjenjem temperature sušenja. Međutim, smanjenjem temperature sušenja značajno se produžuje vrijeme sušenja te se povećavaju troškovi. Do promjene boje uslijed djelovanja gljivica dolazi prilikom sporog sušenja kada je sadržaj vlage iznad 40%. Kako bi se izbjegla promjena boje uslijed djelovanja gljivica piljenice se nakon sušenja trebaju odmah poslagati u složaje u okolišu koji ima relativnu vlažnost ispod 92%. Tijekom sušenja u složajima može doći do promjene boje piljenice na mjestu gdje je naslonjena na dasku koja drži razmak između slojeva složaja, a uzrok promjene boje mogu biti kemijske promjene ili gljivice [3].



Slika 9. Obojenje piljenica uslijed djelovanja gljivica tijekom sušenja [4]

3. KONVEKTIVNO SUŠENJE PILJENE DRVNE GRAĐE

Prva metoda sušenja drva koja se primjenjivala bila je prirodno sušenje drva koje se slagalo u pravilne složaje te se pod utjecajem energije vjetra i Sunca polako sušilo. Prilikom prirodnog sušenja, vanjski zrak strujanjem kroz složaje zagrijava (ako je temperatura zraka veća od temperature piljenice) piljenice te na sebe preuzima ishlapljenu vlagu. Prirodno sušenje ovisi o vanjskim parametrima (temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja okolišnog zraka) na koje nemamo utjecaj te posljedično ne možemo osigurati određenu kvalitetu proizvoda. Nadalje, zbog nepovoljnih okolišnih uvjeta može doći do značajnog produljenja vremena sušenja, čak i do jedne godine (ako je okolišni zrak hladan i ima veliku relativnu vlažnost) ili može doći do prebrzog sušenja uslijed kojeg nastaju oštećenja (okolišni zrak je visoke temperature i ima nisku relativnu vlažnost). Zbog povećanih zahtjeva kupaca na kvalitetu te velikih ekonomskih gubitaka povezanih s duljinom sušenja i stvaranjem škarta, prirodno sušenje se danas većinom ne koristi. Prirodno sušenje može poslužiti kao pripremna faza kako bi se piljenicama bez utroška energije snizio sadržaj vlage prije njihovog ulaska u komorne konvektivne sušare [3].



Slika 10. Primjer slaganja u pravilan složaj za prirodno sušenje u natkrivenom prostoru. [3]

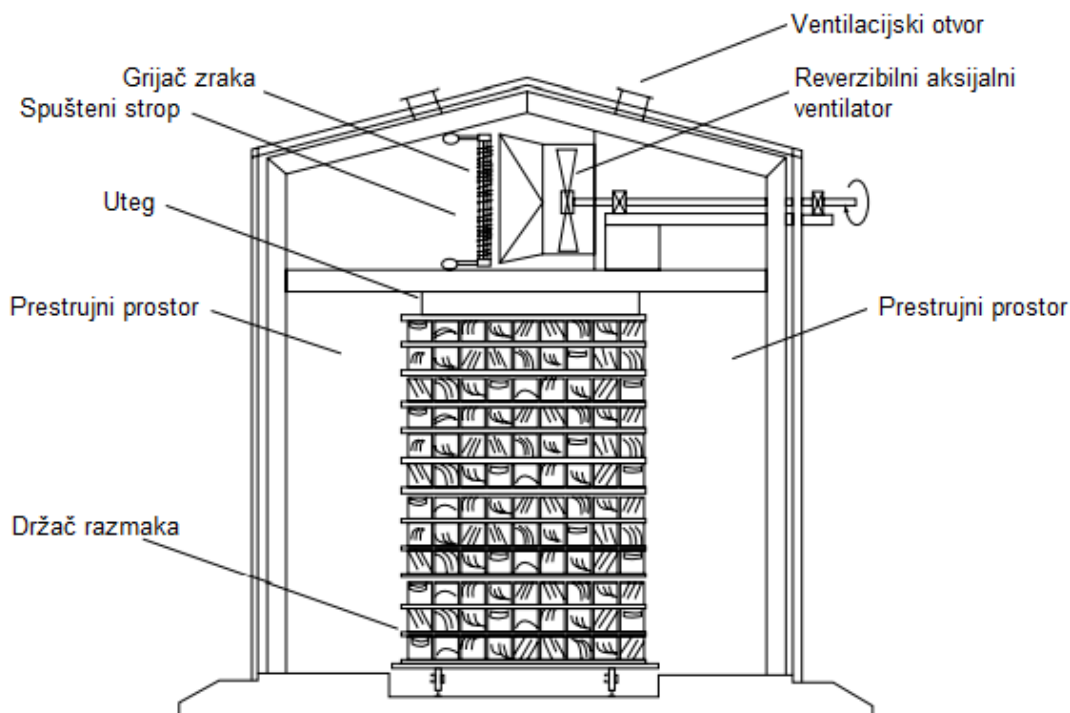
3.1. Komorne konvektivne sušare

Komorne konvektivne sušare omogućuju umjetno stvaranje okoliša koji je pogodan za proces sušenja. Komorne konvektivne sušare kao radni medij koriste zrak čija se temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja može prilagoditi trenutnim potrebama sušenja. Prednosti korištenja komornih konvektivnih sušara naspram prirodnog sušenja su [3]:

- Veća produktivnost uslijed bržeg sušenja
- Mogućnost utjecaja na kvalitetu krajnjeg proizvoda
- Mogućnost sušenja na bilo koji krajnji sadržaj vlage, ovisno o krajnjoj funkciji drvne građe
- Osim sušenja, moguće je i kontrolirano ovlaživati zrak kako bi na kraju imali što ravnomjerniji sadržaj vlage u složaju
- Zbog viših temperatura sušenja ne može doći do biološke degradacije tijekom sušenja (oštećenja uslijed insekata i gljivičnih infekcija)

Kako bi se drvo pravilno osušilo prije sušenja ga je potrebno poslagati u pravilne složajeve. Poželjno je drvo poslagati u složajeve odmah nakon njegovog piljenja u piljenice kako bi se spriječila biološka degradacija drva. Piljenicama koje se slažu u složaje treba ispitati svojstva te ih treba rasporediti tako da piljenice unutar složaja imaju slična svojstva. Složaji se sastoje od piljenica jednakih duljina slaganih horizontalno u slojeve širine do 2,4 metara, tako da su im bočne stranice položene jedna na drugu bez razmaka i da su im čela poravnata po dužini. Broj vertikalnih slojeva je određen dostupnom visinom u sušari. Između vertikalnih slojeva moraju se postaviti držači razmaka. Držači razmaka su letvice jednake debljine koje služe za osiguravanje ravnomjernog strujanja zraka kroz složaj. U uzdužnom smjeru piljenice držači razmaka se postavljaju na što je moguće većoj udaljenosti, tako da se u pravilu na svakih 600-900 milimetara nalazi držač razmaka. Debljina i uzdužni razmak držača razmaka ovise o debljini piljenice i vrsti drva koje se suši. Radi održavanja razmaka od poda sušare složaji se slažu na posebnim podnicama ili paletama. Nakon slaganja složaji se u komore sušara pune pomoću viličara ili pomoću šina tako da je bočna strana piljenice okomita na smjer strujanja zraka [3].

Ovojnica novijih komora je montažna, a napravljena je od sendvič konstrukcije koja se sastoji od vanjskih slojeva čeličnog ili aluminijskog lima te ispune od izolacijskog materijala. Unutar ovojnice glavni dijelovi sušare su: ventilatori, grijači zraka, otvori za prozračivanje, osjetnici i ovlaživači zraka [3].



Slika 11. Shema komorne konvektivne sušare [2]

Ventilatori se u komornim sušarama u pravilu nalaze u spušenom stropu iznad složaja piljenica. Ventilatori služe za ostvarivanje prisilne cirkulacije zraka u sušari, zbog koje dolazi do prijenosa topline i vlage između zraka i piljenica. Kako bi korisnik sušare imao što veću kontrolu nad procesom sušenja i kako bi se smanjila potrošnja energije, novije sušare imaju ventilatore s promjenjivom brzinom vrtnje. Ventilatori trebaju biti i reverzibilni kako bi se mijenjanjem smjera strujanja zraka osiguralo ravnomjerno sušenje složaja [3].

Toplina potrebna za ishlapljivanje vlage se zraku predaje pomoću grijača zraka, koji je u većini slučajeva napravljen kao snop čeličnih cijevi s aluminijskim lamelama. Grijači su u pravilu smješteni nasuprot ventilatora u spušenom stropu. Najčešći izvor topline u konvencionalnim sušarama su toplovodni ili parni kotlovi koji u idealnom slučaju koriste otpadnu biomasu kao gorivo. Zrak zagrijan na potrebnu temperaturu predaje toplinu piljenicama konvekcijom te istovremeno preuzima na sebe vlagu ishlapljenu s piljenice. Tijekom prolaska kroz složaj zraku opada temperatura te mu raste relativna vlažnost, a nakon prolaska kroz složaj zrak se ponovno vraća na grijače zraka kako bi se zagrijao na temperaturu sušenja. Nakon što se zrak koji struji u komori zasiti vlagom, on se kroz otvore za ventilaciju ispusti te se zamjeni sa svježim zrakom. Cirkulirajući zrak se radi regulacije relativne vlažnosti u sušari može i prije zasićenja djelomično zamijeniti sa svježim zrakom. Osim zamjene zasićenog zraka, relativna vlažnost zraka u sušari se može kontrolirati i pomoću ovlaživanja zraka. Zrak se može ovlaživati

ubrizgavanjem pare ili ubrizgavanjem kapljevite vode u struju zraka. Ubrizgavanje pare treba vršiti pažljivo kako ne bi unijeli previše topline u sušaru i tako previše povišili temperaturu zraka [3].

Kako bi se proces kvalitetno vodio potrebno je odabrati optimalan režim sušenja. Režim sušenja se sastoji od određenog broja koraka kojima su definirane promjene stanja zraka tijekom procesa sušenja. Prelasci s koraka na korak se definiraju ili vremenskim trajanjem određenog koraka ili praćenjem trenutnog sadržaja vlage piljenica. Režim sušenja se odabire na temelju sljedećih faktora [3]:

- Vrsta sušare u kojoj se provodi proces sušenja
- Vrsta drva koja se suši
- Debljina piljenica koje se suše
- Iz kojeg dijela trupca su izrezane piljenice
- Dopuštena razina oštećenja
- Krajnja funkcija piljenice

Neovisno o odabranom režimu ciklus sušenja se može podijeliti na sljedeće osnovne korake [6]:

1. Faza zagrijavanje sušare i piljenica

Faza zagrijavanja se dijeli na aktivnu i pasivnu fazu. Pasivna faza traje dok se unutar sušare ne uspostavi temperatura od 20°C, a što je vanjska temperatura viša ova faza kraće traje. Nakon postizanja 20°C počinje faza aktivnog zagrijavanja, te ona traje do postizanja temperature koja je određena prvim korakom odabranog režima sušenja. U ovoj fazi se počinju kontrolirati temperatura, relativna vlažnosti i brzina strujanja zraka, a također se kontrolira i koliko je isušena površina drva. Kako bi se proces sušenja mogao pravilno provesti površina ne smije biti previše suha. Ako se detektira da se ona previše osušila, mora se provesti njezino ovlaživanje. Za trajanje faze zagrijavanja ključne su vanjska temperatura, početna vlažnost, te vrsta i debljina drva. Zagrijavanje se mora provoditi postupno otprilike 3-8°C po satu.

2. Faza sušenja iznad točne zasićenosti vlakanaca

Faza sušenja iznad točne zasićenosti vlakanaca počinje kada se postigne temperatura prvog koraka odabranog režima sušenja. U ovoj fazi se većinom odnosi slobodna vlaga, te dolazi do djelomičnog izvlačenja i vezane vlage kada sadržaj vlage padne ispod 50%. Faza traje dok se ne postigne točka zasićenja vlakanaca, to jest do nekih 30%. Sušenje iznad točke zasićenosti se može provoditi s konstantnim stanjem zraka, ili se proces može ubrzati promjenom stanja zraka

ovisno o sadržaju vlage u piljenicama. Međutim, proces s promjenjivim stanjem zraka je puno kompliciraniji za vođenje te zahtjeva odlično poznavanje procesa.

3. Faza sušenja ispod točke zasićenosti vlakanaca - promjenjiva temperatura zraka

Smanjenjem sadržaja vlage u piljenicama ispod točke zasićenja vlakanaca dolazi do početka izdvajanja vezane vlage što zahtjeva veću količinu energije pa je potrebno postepeno povećavati temperaturu zraka u sušari. Brzina sušenja najviše ovisi o temperaturi zraka, te ona postepeno raste do najveće temperature određene režimom sušenja. U ovoj fazi dolazi do početka stezanja drva pa treba obratiti posebnu pažnju na izbjegavanje nastanka oštećenja.

4. Faza sušenja ispod točke zasićenosti vlakanaca - konstantna temperatura zraka

Faza traje od postizanja najveće temperature određene režimom sušenja do kraja sušenja, to jest do postizanja traženog ravnotežnog sadržaja vlage. U ovoj fazi rijetko dolazi do nastanka novih oštećenja.

5. Izjednačavanje i kondicioniranje piljenica

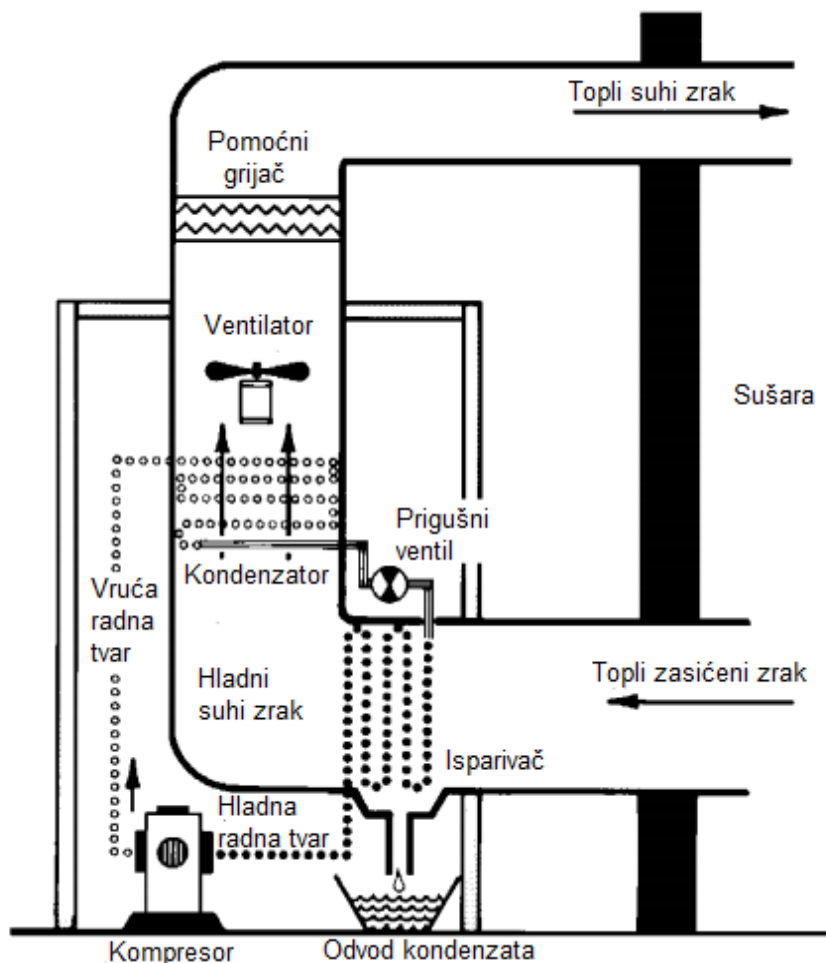
Sušenje je gotovo kada piljenice u kojima se nalaze sonde za ispitivanje sadržaja vlage pokažu traženi krajnji sadržaj vlage. Međutim, to ne znači da su sve piljenice u sušari na traženom krajnjem sadržaju vlage. Kako bi bili sigurni da sve piljenice u sušari imaju traženi sadržaj vlage potrebno je provesti postupak izjednačavanja. Ovaj postupak traje sve dok najvlažniji ispitni komad ne postigne traženi sadržaj vlage. Nakon što je i najvlažniji ispitni komad postigao traženi sadržaj vlage, počinje postupak kondicioniranja koji ima za cilj izjednačenje sadržaja vlage po debljini piljenica te otpuštanje zaostalih naprezanja. Oba ova postupka se vrše na temperaturi definiranoj prema zadnjem koraku režima sušenja. Prilikom izjednačavanja ravnotežni sadržaj vlage mora biti 2% manji od traženog ravnotežnog sadržaja vlage, a prilikom kondicioniranja mora biti 1,5-3% veći (ovisno o vrsti drva).

6. Hlađenje sušare i piljenica

Faza hlađenja piljenica ovisi o vanjskim uvjetima pa je tako pri višim vanjskim temperaturama piljenice potrebno ohladiti do 30°C, dok ih je pri nižim temperaturama potrebno ohladiti do 20°C. Sniženje temperature u sušari postizemo prestankom napajanja vodenih grijača zraka uz nastavak kontroliranog strujanja zraka. U sušari je potrebno i dalje održavati ravnotežni sadržaj vlage.

3.2. Kondenzacijske sušare

Klimatske promjene su najveći izazov 21. stoljeća, te kako bi ih suzbili potrebno je poboljšati postojeće tehničke procese kako bi bili što učinkovitiji. Kao što je već navedeno sušenje je energetski jako intenzivan i zahtjevan proces zbog velike latentne topline ishlapljene vlage te zbog male učinkovitosti konvencionalnih komornih konvektivnih sušara. Prilikom strujanja, zrak u sušari predaje toplinu piljenicama koja se iskorištava za ishlapljivanje vlage, a istovremeno na sebe preuzima ishlapljenu vlagu. Komorne konvektivne sušare imaju malu učinkovitost zato što se regulacija vlažnosti zraka u sušari vrši izmjenom zasićenog zraka u sušari s vanjskim zrakom. Kondenzacijske sušare također spadaju u konvektivne sušare, međutim regulacija vlažnosti zraka u sušari se skoro nikada ne vrši izmjenom zasićenog zraka s vanjskim zrakom već se vrši odvlaživanjem zraka tako da se on hladi ispod točke rosišta. U kondenzacijskim sušarama se za obradu zraka u sušari koristi dizalica topline zrak-zrak. Nakon prolaska kroz složaj zrak se odvodi na isparivač dizalice topline gdje radnoj tvari predaje toplinu. Predavanjem topline radnoj tvari zrak se hladi ispod točke rosišta, a vlaga sadržana u zraku počinje kondenzirati, čime dolazi do njegova odvlaživanja. Radna tvar preuzimanjem topline isparava te se odvodi u kompresor gdje joj raste tlak i temperatura, a nakon čega se odvodi u kondenzator. Zrak koji je nakon prolaska kroz isparivač odvlažen se zatim odvodi na kondenzator gdje preuzima toplinu od radne tvari kako bi postigao stanje koje je traženo na ulasku u složaj [8].



Slika 12. Shema kondenzacijske sušare [4]

Glavna prednost kondenzacijskih sušara je povećana iskoristivost zbog povrata latentne topline ishlapljivanja. Na primjer, ispitivanjem konvencionalne i kondenzacijske sušare za sušenje četinjače s početnog sadržaja vlage 140% na krajnji sadržaj vlage 12% izmjerena je ukupna potrošnja energije u iznosu od 0,6 GJ/m³ za kondenzacijsku sušaru te 2,5 GJ/m³ za konvencionalnu sušaru [3]. Nadalje, kondenzacijske sušare omogućuju veliki raspon stanja zraka u sušari, na primjer, temperatura sušenja od 20-100°C (uz pomoćne grijače) te relativna vlažnost od 15-80% (uz dodatno ovlaživanje zraka). Osim velikog raspona stanja zraka kondenzacijske sušare nude i preciznu kontrolu stanja zraka na ulazu u sušaru. Veliki raspon mogućih stanja zraka te precizna kontrola stanja zraka na ulazu u sušaru omogućavaju da se proces sušenja puno kvalitetnije vodi pa se posljedično dobiva kvalitetniji proizvod s manje oštećenja [8].

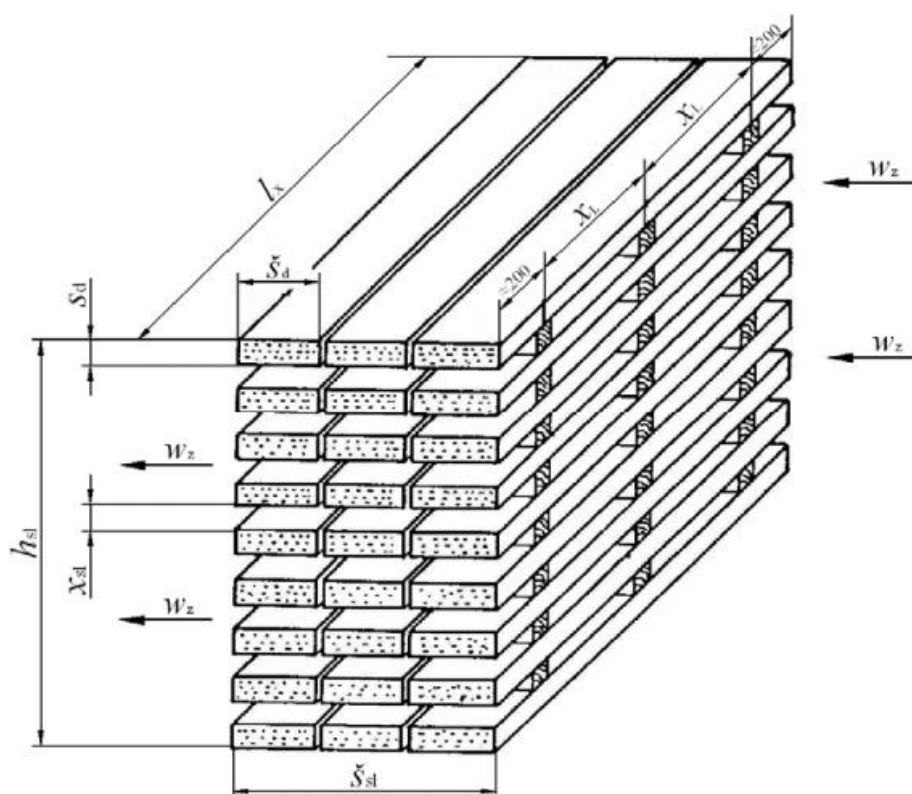
Kondenzacijske sušare naspram konvencionalnih zahtijevaju veća početna ulaganja te imaju veće troškove održavanja. Međutim, u procesima sušenja troškovi pogona su puno veći od

investicijskih troškova što znači da se uvijek isplati povećati početnu investiciju kako bi se dobili povoljniji pogonski troškovi [8]. Nadalje, dizalica topline zrak-zrak ne može provesti zagrijavanje sušare zato što zahtjeva određenu vlažnost zraka u sušari kako bi mogla početi s radom što znači da je za pokretanje procesa potrebno osigurati dodatni izvor toplinske energije. Također, dizalice topline zrak-zrak ne može postići temperature više od 55-60°C što znači da je za režime sušenja koje zahtijevaju više temperature potrebno koristiti dodatne grijače s odvojenim izvorom topline. Zbog nemogućnosti postizanja viših temperatura, proces sušenja u pravilu duže traje (eksponencijalni rast dužine sušenja s povećanjem debljine piljenica) nego kod konvencionalnih sušara, pogotovo kod vrsta drva koje dobro podnose vrlo visoke temperature sušenja [3].

4. DIMENZIONIRANJE SLOŽAJA I KOMPONENTI KONDENZACIJSKE SUŠARE DRVA

4.1. Dimenzioniranje složaja

Za postizanje prihvatljive ravnomjernosti i kvalitete sušenja vrlo je bitno dobro oblikovati složaj. Kroz uredno složeni složaj strujanje zraka je jednolično te dolazi do manje grešaka sušenja.[9] Piljenice debljine do 40 mm slažu se bez horizontalnog razmaka jedna do druge tako da su im čela poravnata u uzdužnom smjeru. Za održavanje vertikalnog razmaka između piljenica koriste se letvice koje se u složaju slažu jedna iznad druge na odgovarajućim udaljenostima u uzdužnom smjeru piljenica. Također je vrlo važno da su krajevi piljenica poduprti letvicama kako bi se smanjile deformacije tijekom sušenja.[10]



Slika 13. Karakteristične dimenzije složaja.[11]

Prema pravilima struke složaj ne bi trebao biti niti širi (oznaka s_{sl} na slici 13.) niti viši (oznaka h_{sl} na slici 13.) od 1500 mm, dok je dužina piljenica (oznaka l_x na slici 13.) u složaju određena oblikom sušare te primjeni piljenice nakon sušenja, no najčešća duljina je do 2000 mm.[10]

Kako bi se postiglo što ravnomjernije sušenje letvice trebaju biti istih dimenzija. Najčešće su kvadratnog presjeka, zato što se tako postiže najbolji omjer između stabilnosti i prekrivanja površine piljenice koja se suši.[6] Razmak između letvica u uzdužnom smjeru piljenice (oznaka x_L na slici 13.) ne smije biti prevelik kako ne bi došlo do izvijanja piljenica prilikom sušenja.[10]

Visina letvica (oznaka x_{sl} na slici 13.) i njihov međusobni razmak u uzdužnom smjeru piljenice određuju se prema debljini piljenice (oznaka s_d na slici 13.). Karakteristični iznosi debljine i uzdužnog razmaka letvica u odnosu na debljinu piljenice nalaze se u tablici 1. i tablici 2.[6]

Tablica 1. Karakteristični iznosi debljine letvica u ovisnosti o debljini piljenica

Debljina piljenice s_d , mm	Debljina letvice x_{sl} , mm
18 - 32	22 - 25
38 - 50	25
≥ 50	35 - 40

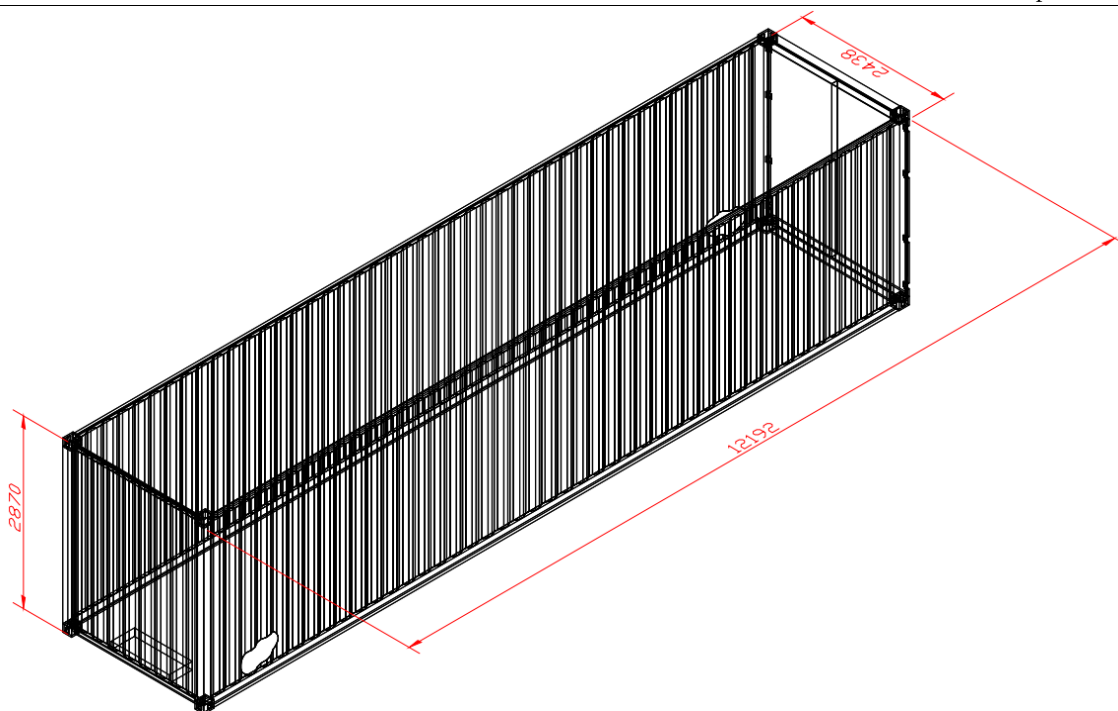
Tablica 2. Karakteristični razmaci između letvica u uzdužnom smjeru piljenice u odnosu na debljinu piljenice.

Debljina piljenice s_d , mm	Uzdužni razmak između letvica x_L , mm
<27	400 - 800
27 - 50	600 - 900
50 - 70	800 - 1000

Predviđena sušara je kontejnerskog tipa, standardne veličine 40 stopa visoke izvedbe. Kontejnerska izvedba sušare omogućuje lakši prijenos do konačnog mjesta ugradnje pošto se zbog svojih standardnih dimenzija može kao gotovi proizvod prevesti na kamionskoj prikolici. Također, zbog kontejnerske izvedbe nije potrebno tražiti građevinsku dozvolu prilikom postavljanja sušare čime se skraćuje vrijeme između narudžbe i početka rada sušare. Kontejnerska sušara se vrlo lako puni sa složajevima pomoću šina. Unutarnje dimenzije kontejnera iznose:

- Visina: 2690 mm
- Širina: 2350 mm
- Dužina: 12032 mm

Kontejner i njegove vanjske dimenzije prikazane su na slici 14.



Slika 14. Vanjske dimenzije standardnog brodskog kontejnera koji se koristi kao komora za sušenje.

Unutar kontejnera nalazit će se dva odvojena prostora, strojarnica i komora za sušenje. U strojarnici se nalazi kompresor, razvod i armatura dizalice topline te centralno upravljačko računalo. Unutar komore za sušenje prostor je podijeljen na prostor za slaganje složaja i podstropni prostor u kojem su smješteni ventilatori i izmjenjivači topline (isparivač i kondenzator dizalice topline te predgrijači). Stoga, za slaganje složaja unutar kontejnera dostupan je prostor sljedećih dimenzija:

- Visina: 2000 mm
- Širina: 1400 mm
- Dužina: 9700 mm

U kontejnerskoj sušari će se sušiti piljenice bukve i hrasta sljedećih dimenzija:

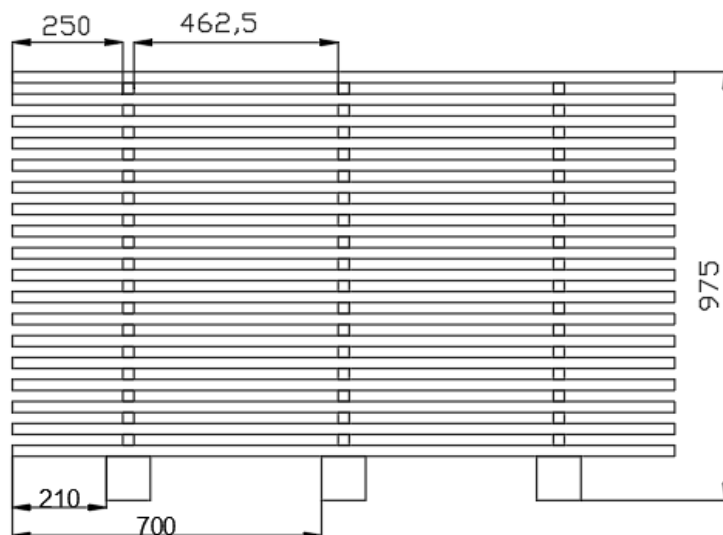
- Duljina piljenice: 1500 mm
- Širina piljenice: 280 mm
- Debljina piljenice: 25 mm

Prema dostupnom prostoru unutar kontejnera, dimenzijama piljenica koja se suše te pravilima struke odabrane su sljedeće dimenzije složaja:

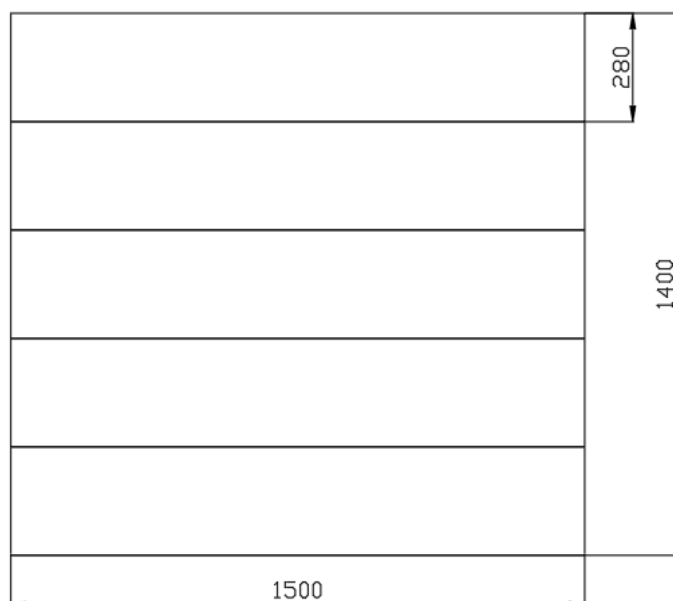
- Debljina letvica za držanje razmaka: 25 mm
- Uzdužni razmak između letvica: 462,5 mm
- Razmak od poda, to jest, od sljedećeg složaja u vertikalnom smjeru: 100 mm

- Visina složaja: ≤ 1000 mm
- Širina složaja: ≤ 1400 mm
- Duljina složaja: ≤ 1500 mm

Prema odabranim dimenzijama formira se složaj koji sadrži 18 piljenica u vertikalnom smjeru, s po 5 piljenica u horizontalnom smjeru svakog sloja. Ukupan broj piljenica po složaju iznosi 90. Razmak od poda i od idućeg složaja (u vertikalnom smjeru) drže tri grede kvadratnog presjeka 100x100 mm, koje su od krajeva udaljene 210 mm dok je unutarnja greda na sredini složaja udaljena od kraja složaja 700 mm. Letvice koje drže razmak između piljenica su poravnate s gredama tako da je sredina letvice poravnana sa sredinom grede. Letvice su na razmaku od 462,5 mm. Letvice i grede izrađene su od jele zato što naspram borovih letvica ne uzrokuju obojenje te su manje podložne deformacijama naspram bukovih letvica.[10] Bokocrt složaja prikazan je na slici 15. dok je tlocrt prikazan na slici 16.

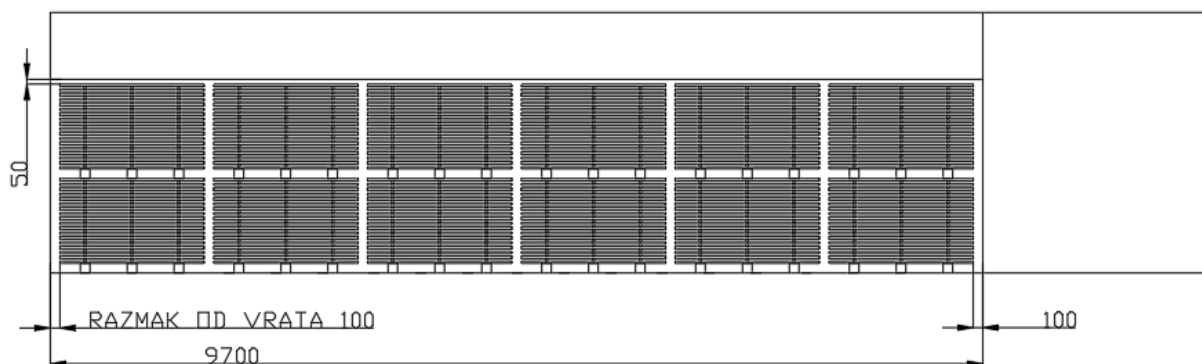


Slika 15. Bokocrt složaja drva.

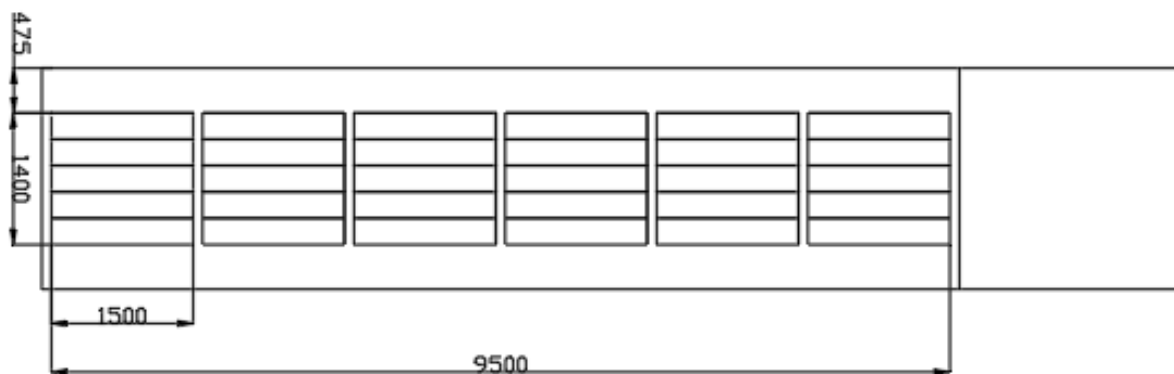


Slika 16. Tlocrt složaja drva.

Prema dostupnom prostoru unutar kontejnerske komore za sušenje, u vertikalnom smjeru stanu dva složaja dok u uzdužnom smjeru stanu šest složaja drva. Ukupan broj složaja koji stane u sušaru je 12, uz 50 mm slobodnog prostora iznad složaja te 100 mm između složaja i između složaja i kraja komore za sušenje u uzdužnom smjeru. Bokocrt složaja unutar sušare prikazan je na 16. slici dok je tlocrt prikazan na 17. slici.



Slika 17. Bokocrt složaja unutar sušare.



Slika 18. Tlocrt složaja unutar sušare

Volumen jedne piljenice iznosi:

$$V_{pilj} = s_d \cdot l_x \cdot s_s = 0,025 \cdot 1,5 \cdot 0,28 = 0,0105 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Volumen piljenica unutar složaja iznosi:

$$V_{pilj,sl} = V_{pilj} \cdot n_{pilj,sl} = 0,0105 \cdot 90 = 0,945 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Volumen piljenica koji stane unutar sušare iznosi:

$$V_{pilj,suš} = V_{pilj} \cdot n_{sl} = 0,945 \cdot 12 = 11,34 \text{ m}^3 \quad (3)$$

4.2. Proračun potrebne količine zraka, broja ventilatora te pada tlaka unutar sušare

Osim pravilno složenog složaja, za ravnomjerno i kvalitetno sušenje drva potrebno je osigurati dostatan protok zraka unutar sušare. Protok zraka unutar sušare mora biti dostatan da zrak na sebe može primiti svu vlagu koja se ishlapi nakon što se prenese iz unutrašnjosti piljenice na površinu. Protok zraka unutar sušare se određuje na temelju brzine strujanja koju želimo postići unutar složaja. Za postizanje potrebnog protoka koriste se visokoučinkoviti reverzibilni aksijalni ventilatori s frekventno reguliranom brzinom vrtnje. Ventilatori moraju biti reverzibilni kako bi se u određenim vremenskim intervalima obrnuo smjer strujanja, radi ravnomjernijeg sušenja piljenica.

Površina poprečnog presjeka prazne komore za sušenje okomito na smjer strujanja zraka iznosi:

$$A_{kom,suš,popr,pres} = d_{kom,suš} \cdot h_{kom,suš} = 9,7 \cdot 2 = 19,40 \text{ m}^2 \quad (4)$$

Površina poprečnog presjeka jednog složaja okomito na smjer strujanja zraka jednaka je zbroju površine poprečnog presjeka piljenica, površine poprečnog presjeka letvica i površine poprečnog presjeka greda za držanje razmaka, te iznosi:

$$\begin{aligned} A_{sl,popr,pres} &= i_h \cdot s_d \cdot l_x + 3 \cdot (i_h - 1) \cdot h_{letvice} \cdot d_{letvice} + 3 \cdot h_{grede} \cdot d_{grede} \\ &= 18 \cdot 0,025 \cdot 1,5 + 3 \cdot (18 - 1) \cdot 0,025 \cdot 0,025 + 3 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \\ &= 0,74 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Površina poprečnog presjeka svih složaja okomito na smjer strujanja zraka jednaka je umnošku površine poprečnog presjeka i broja složaja unutar komore za sušenje, te iznosi:

$$A_{sl,popr,pres,uk} = A_{sl,popr,pres} \cdot n_{sl} = 0,74 \cdot 12 = 8,84 \text{ m}^2 \quad (6)$$

Prostrujna površina za strujanje zraka unutar komore sušare jednaka je razlici površine poprečnog presjeka prazne komore za sušenje i površine poprečnog presjeka svih složaja:

$$\begin{aligned} A_{pros,povr} &= A_{kom,suš,popr,pres} - A_{sl,popr,pres,uk} = 19,4 - 8,84 \\ &= 10,56 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Za srednje i niskotemperaturno sušenje preporučeni raspon brzine strujanja zraka kroz složaj iznosi 2-5 m/s. Na većim brzinama strujanja drvo se brže i ravnomjernije suši, međutim puno su češće greške sušenja te je potrošnja energije puno veća. Nadalje, velike brzine sušenja zahtijevaju veće ventilatore što znači da je manje prostora dostupno za slaganje složaja.[3] Stoga, kako bi se postigla ravnoteža između brzine sušenja, kvalitete sušenja te potrošnje energije i prostora za ventilatore odabrana maksimalna brzina u složaju iznosi:

$$w_{z,max} = 2,5 \text{ m/s} \quad (8)$$

Pretpostavljena maksimalna brzina je veća od najveće radne brzine radi sigurnosti, odnosno da se osigura mogućnost većeg protoka ako se promjene uvjeti sušenja.

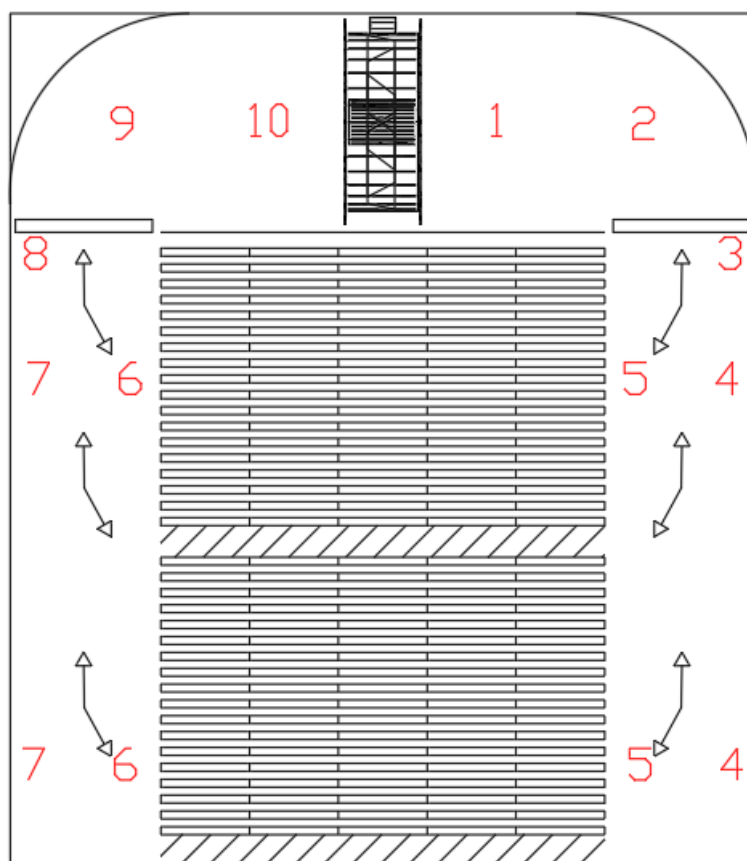
Potrebna količina zraka pri maksimalnoj brzini strujanja zraka kroz komoru za sušenje iznosi:

$$\dot{V}_{sl,max} = A_{pros,povr} \cdot w_z = 10,56 \cdot 2,5 = 26,394 \text{ m}^3/\text{s} = 95017,5 \text{ m}^3/\text{h} \quad (9)$$

Za odabir ventilatora osim potrebnog protoka zraka bitno je odrediti i pad tlaka uslijed strujanja kroz sušaru. Pad tlaka unutar sušare se računa prema sljedećem izrazu[12]:

$$\Delta p_{uk} = \sum_{i=1}^n k_{R,i} \cdot \frac{w_{z,i}^2 \cdot \rho_z}{2} \quad (10)$$

Faktor $k_{R,i}$ predstavlja faktor otpora strujanja te se njegova vrijednost određuje tablično ovisno o poziciji unutar sušare. Na slici 19. su prikazane karakteristične pozicije unutar sušare za koje se računa pad tlaka.



Slika 19. Prikaz karakterističnih pozicija za računanje pada tlaka

U tablici 3. prikazani su faktori otpora strujanja zraka $k_{R,i}$ između karakterističnih točaka označenih na slici 19. Nadalje, u tablici 3. su definirane i brzine strujanja između karakterističnih točaka. Brzine strujanja izračunate su prema sljedećem izrazu:

$$w_z = \frac{\dot{V}_{sl,max}}{A_{pros,pov,i}} \quad (11)$$

Tablica 3. Iznosi veličina potrebnih za računanje pada tlaka između karakterističnih točaka

Točke	Raspon faktora otpora strujanja zraka, k_R	Odabrani faktor otpora strujanja zraka, k_R	Površina strujanja između točaka, $A_{nastr,i}$ [m ²]	Brzina strujanja između točaka, $w_{z,i}$ [m/s]
1 - 2	2 - 3,5	2,75	6,693	3,94
2 - 3	2 - 5	2,6	4,6075	5,73
3 - 4	0,2 - 0,4	0,3	4,6075	5,73
4 - 5	0,4 - 0,9	0,65	19,4	1,36
5 - 6	2 - 16	4	10,56	2,5
6 - 7	0,4 - 0,9	0,65	19,4	1,36
7 - 8	0,2 - 0,4	0,3	4,6075	5,73
8 - 9	2 - 5	2,6	4,6075	5,73
9 - 10	2 - 3,5	2,75	6,693	3,94

Gustoća zraka iznosi:

$$\rho_z = 1,2 \text{ kg/m}^3 \quad (12)$$

Ukupni pad tlaka unutar sušare iznosi:

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{uk} &= \sum_{i=1}^n k_{R,i} \cdot \frac{w_{z,i}^2 \cdot \rho_z}{2} \\
 &= 2,75 \cdot \frac{3,94^2 \cdot 1,2}{2} + 2,6 \cdot \frac{5,73^2 \cdot 1,2}{2} + 0,3 \cdot \frac{5,73^2 \cdot 1,2}{2} \\
 &\quad + 0,65 \cdot \frac{1,36^2 \cdot 1,2}{2} + 4 \cdot \frac{2,5^2 \cdot 1,2}{2} + 0,65 \cdot \frac{1,36^2 \cdot 1,2}{2} \\
 &\quad + 0,3 \cdot \frac{5,73^2 \cdot 1,2}{2} + 2,6 \cdot \frac{5,73^2 \cdot 1,2}{2} + 2,75 \cdot \frac{3,94^2 \cdot 1,2}{2} + = 183,92 \text{ Pa}
 \end{aligned} \quad (13)$$

Prema padu tlaka odabiru se ventilatori proizvođača Systemair, tip AR 560E4 koji pri izračunatom padu tlaka dobavljaju 7656 m³/h zraka. Maksimalna snaga elektromotora iznosi 1150 W, dok u radnoj točki potrebna snaga iznosi 1128 W. Potreban broj ventilatora za dobavu zraka pri maksimalnoj brzini strujanja zraka u sušari od 2,5 m/s iznosi:

$$n_{\text{vent}} = \frac{\dot{V}_{\text{sl,max}}}{V_{\text{vent}}} = \frac{95017,5}{7656} = 12,41 \quad (14)$$

Za dobavu zraka pri maksimalnoj brzini strujanja zraka u sušari potrebno je 13 ventilatora protoka zraka 7656 m³/h pri padu tlaka od 184 Pa.

4.3. Odabrani režim sušenja

Odabrani režim namijenjen je za konvencionalno konvektivno sušenja piljenica bukve i hrasta većih debljina, međutim usvojen je za potrebe niskotemperaturnog kondenzacijskog sušenja zato što nije bilo konkretnih primjera režima za kondenzacijsko niskotemperaturno sušenje u literaturi i zato što je maksimalna temperatura režima ispod 60°C.

Tablica 4. Odabrani režim sušenja

Sadržaj vlage piljenica [%]	Temperatura zraka na ulazu u sušaru [°C]	Relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru [%]
>40	40,6	85
40	43,3	80
30	46,1	75
25	48,9	70
20	51,7	60
15	54,5	50
10	57,2	40

4.4. Proračun potrebne snage predgrijača

Kondenzacijske sušare kao izvor topline koriste latentnu toplinu vlage sadržane u struji zraka. Pošto na početku sušenja zrak u sušari nije dovoljno zagrijan proces sušenja treba pokrenuti pomoćnim grijačima. Pomoćni grijači mogu biti lamelni elektrootporni grijači zraka ili mogu biti lamelni grijači zraka napajani parom ili toplom vodom iz kotla. Toplinska snaga grijača

jednaka je zbroju snage potrebne za pokrivanje transmisijских gubitaka kroz krov, zidove i pod sušare te snage potrebne za zagrijavanje zraka, piljenica, letvica i greda koje se nalaze u sušari u određenom vremenskom intervalu.[3]

4.4.1. Proračun transmisijских gubitaka na temperaturi predgrijanja

Transmisijски gubici jednaki su zbroju transmisijских gubitaka krova, zidova i poda. Transmisijски gubici krova i zidova računaju se množenjem površine plohe za koju se računaju, s pripadajućim koeficijentom prolaza topline i pripadajućom temperaturnom razlikom. Transmisijски gubici poda računaju se množenjem korekcijskog faktora za utjecaj godišnje oscilacije vanjske temperature, faktora smanjenja temperaturne razlike, korekcijskog faktora za utjecaj podzemnih voda, ekvivalentnog koeficijenta prolaza topline prema tipologiji poda i površine poda s pripadajućom temperaturnom razlikom. Odnosno, ukupni transmisijски gubici računaju se prema sljedećem izrazu[13]:

$$\begin{aligned}\Phi_{T,uk} &= \Phi_{T,krov,zid} + \Phi_{T,pod} \\ &= ((\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i) + (f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot G_w (\sum_{k=1}^n U_{equiv,k} \cdot A_k))) \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_v) \quad (15)\end{aligned}$$

Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu proračuna iznose:

- Temperatura predgrijanja kontejnera $\vartheta_{u,predgr} = 41 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Vanjska projektna temperatura $\vartheta_v = -9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Srednja godišnja temperatura zraka $\vartheta_{m,v,god} = 11,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Površina krovne plohe $A_{krov} = 22,795 \text{ m}^2$
- Površina bočnih ploha $A_{bok} = 26,093 \text{ m}^2$
- Površina vrata i poledinske plohe $A_{v,p} = 6,322 \text{ m}^2$
- Površina podne plohe $A_{pod} = 22,795 \text{ m}^2$
- Korekcijski faktor za utjecaj godišnje vanjske temperature $f_{g1} = 1,45$
- Korekcijski faktor za utjecaj podzemnih voda, za dubinu voda $\geq 1 \text{ m}$, $G_w = 1$
- Konstrukcija poda je u razini tla, odnosno dubina konstrukcije ispod površine tla $z = 0 \text{ m}$
- Ukupna duljina vanjskih zidova koji odvajaju grijani prostor od vanjskog okoliša $P = 24,1 \text{ m}$

Kako bi odredili koeficijente prolaza topline potrebno je odrediti unutarnji i vanjski koeficijent prijelaza topline. Koeficijenti prijelaza topline dobivaju se iz *Nusseltovog* broja, odnosno prema sljedećem izrazu[14]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{\text{karakt}}} \quad (16)$$

Proračun unutarnjih koeficijenata prijelaza topline radi se prema modelu prisilne konvekcije uslijed strujanja tekućine uz ravnu stijenku. Režim strujanja određuje se prema iznosu *Reynoldsove* značajke. Ako je *Reynoldsova* značajka manja od $5 \cdot 10^5$ strujanje je laminarno, a ako je veća od $5 \cdot 10^5$ strujanje je turbulentno. *Reynoldsova* značajka definirana je prema sljedećem izrazu[14]:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot L}{\mu} \quad (17)$$

Za laminarno strujanje vrijedi jednadžba[14]:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (18)$$

Za turbulentno strujanje vrijedi jednadžba[14]:

$$Nu = 0,0325 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (19)$$

Fizikalna svojstva zraka očitavaju se za atmosferski tlak i srednju temperaturu između temperature stijenke i unutrašnje temperature zraka. Temperatura stijenke se računa iterativno, međutim u ovom slučaju je pretpostavljena kao srednja temperatura između temperature predgrijanja i vanjske projektne temperature zraka. Pošto proračun gubitaka topline služi samo za određivanje potrebne snage pomoćnih grijača, ova pretpostavka neće znatno utjecati na rezultate proračuna. Stoga, pretpostavljena temperatura stijenke iznosi:

$$\vartheta_s = \frac{\vartheta_{u,\text{predgr}} + \vartheta_v}{2} = \frac{41 - 9}{2} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

Srednja temperatura između pretpostavljene temperature stijenke i unutrašnje temperature zraka iznosi:

$$\vartheta_{m,u} = \frac{\vartheta_{u,\text{predgr}} + \vartheta_s}{2} = \frac{41 + 16}{2} = 28,5^{\circ}\text{C} \quad (21)$$

Fizikalna svojstva zraka očitana su pomoću programskog paketa CoolProp[15], te iznose:

- Dinamička viskoznost $\mu = 0,000018617 \text{ Pas}$
- Gustoća $\rho = 1,171 \text{ kg/m}^3$
- *Prandtlov* broj $Pr = 0,7069$

- Toplinska provodnost $\lambda = 0,02651 \text{ W/(m K)}$

Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s unutarnje strane stijenke prema modelu strujanja tekućine uz ravnu stijenku prikazani su tablici 4.

Tablica 5. Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s unutarnje strane na temperaturi predgrijavanja.

Ploha	Duljina plohe [m]	Brzina [m/s]	Re	Nu	Koeficijent prijelaza topline [W/(m ² K)]
Krov	2,11	0,95	125609,12	209,635	2,634
Bočne strane	2,69	1,37	232619,69	285,284	2,811
Vrata/poledina	2,35	0,6	88667,30	176,131	1,987

Proračun vanjskih koeficijenata prijelaza topline radi se prema modelu slobodne konvekcije na ravnoj uspravnoj stijenci. Režim strujanja određuje se prema iznosu umnoška *Grashofove* i *Prandtllove* značajke. Ako je umnožak manji od 10^8 strujanje je laminarno, a ako je veći, strujanje je turbulentno. *Grashofova* značajka za plinove definirana je prema sljedećem izrazu[14]:

$$Gr = \frac{T_s - T_o}{T_o} \frac{g \cdot H^3}{\nu_s^2} \quad (22)$$

Za laminarno strujanje vrijedi jednadžba[14]:

$$Nu = 0,52 \cdot \sqrt[4]{Gr \cdot Pr} \quad (23)$$

Za turbulentno strujanje zraka vrijedi jednadžba[14]:

$$Nu = 0,10 \cdot \sqrt[3]{Gr \cdot Pr} \quad (24)$$

Kinematička viskoznost očitava se za atmosferski tlak i pretpostavljenu temperaturu stijenke.

$$\vartheta_s = \frac{\vartheta_{u,predgr} + \vartheta_v}{2} = \frac{41 - 9}{2} = 16 \text{ °C} \quad (25)$$

Ostala fizikalna svojstva očitavaju se za atmosferski tlak i srednju temperaturu između temperature stijenke i vanjske temperature zraka.

$$\vartheta_{m,v} = \frac{\vartheta_v + \vartheta_s}{2} = \frac{-9 + 16}{2} = 3,5 \text{ °C} \quad (26)$$

Fizikalna svojstva su očitana pomoću programskog paketa CoolProp, te iznose:

- Kinematička viskoznost $\nu_s = 0,0000136202 \text{ m}^2/\text{s}$

- Prandtlov broj $Pr = 0,7103$
- Toplinska provodnost $\lambda = 0,02463 \text{ W/(m K)}$

Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane stijenke prema modelu slobodne konvekcije s ravne uspravne stijenke prikazani su tablici 5.

Tablica 6. Rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane na temperaturi predgrijavanja

Ploha	Duljina plohe [m]	Gr	$Gr \cdot Pr$	Nu	Koeficijent prijelaza topline [W/(m ² K)]
Krov	2,35	$5,5357 \cdot 10^{10}$	$3,9230 \cdot 10^{10}$	340,046	3,564
Bočne strane	2,69	$8,3028 \cdot 10^{10}$	$5,8975 \cdot 10^{10}$	389,244	3,564
Vrata/poleđina	2,35	$5,5357 \cdot 10^{10}$	$3,9230 \cdot 10^{10}$	340,046	3,564

Koeficijent prolaza topline za ravnu stijunku računa se prema sljedećem izrazu[14]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_u}} \quad (27)$$

Krovnna ploha, bočne strana, vrata i poleđina sastoje se od sljedećih slojeva:

- Čelični lim debljine $\delta_{lim,u} = 0,003 \text{ m}$, toplinske provodnosti $\lambda_{\text{č}} = 58 \text{ W/(m K)}$
- Kamena vuna debljine $\delta_{km} = 0,1 \text{ m}$, toplinske provodnosti $\lambda_{km} = 0,035 \text{ W/(m K)}$
- Čelični lim debljine $\delta_{lim,v} = 0,001 \text{ m}$, toplinske provodnosti $\lambda_{\text{č}} = 58 \text{ W/(m K)}$

Podna ploha se sastoji od sljedećih slojeva:

- Čelični lim debljine $\delta_{lim,u} = 0,003 \text{ m}$, toplinske provodnosti $\lambda_{\text{č}} = 58 \text{ W/(m K)}$
- Betonska podloga debljine $\delta_{bet} = 0,5 \text{ m}$, toplinske provodnosti $\lambda_{bet} = 1,65 \text{ W/(m K)}$

Koeficijent prolaza topline za krovnu plohu iznosi:

$$U_{\text{krov}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{u,krov}}} + \frac{\delta_{\text{lim,u}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{\delta_{\text{km}}}{\lambda_{\text{km}}} + \frac{\delta_{\text{lim,v}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{v,krov}}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,564} + \frac{0,003}{58} + \frac{0,1}{0,035} + \frac{0,001}{58} + \frac{1}{2,634}} = 0,284 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (28)$$

Koeficijent prolaza topline za bočne plohe iznosi:

$$U_{\text{bok}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{u,bok}}} + \frac{\delta_{\text{lim,u}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{\delta_{\text{km}}}{\lambda_{\text{km}}} + \frac{\delta_{\text{lim,v}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{v,bok}}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,564} + \frac{0,003}{58} + \frac{0,1}{0,035} + \frac{0,001}{58} + \frac{1}{2,811}} = 0,286 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (29)$$

Koeficijent prolaza topline za vrata i poledinu kontejnera iznosi:

$$U_{\text{v,p}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{u,v,p}}} + \frac{\delta_{\text{lim,u}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{\delta_{\text{km}}}{\lambda_{\text{km}}} + \frac{\delta_{\text{lim,v}}}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{v,bok}}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,564} + \frac{0,003}{58} + \frac{0,1}{0,035} + \frac{0,001}{58} + \frac{1}{1,987}} = 0,275 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (30)$$

Transmisijski gubici topline kroz krov i zidove sušare na temperaturi predgrijanja iznose:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{T,krov,zid}} &= (\vartheta_{\text{u,predgr}} - \vartheta_{\text{v}}) \cdot \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i \\ &= (\vartheta_{\text{u,predgr}} - \vartheta_{\text{v}}) \cdot (U_{\text{krov}} \cdot A_{\text{krov}} + 2 \cdot U_{\text{bok}} \cdot A_{\text{bok}} + 2 \cdot U_{\text{v,p}} \cdot A_{\text{v,p}}) \\ &= (41 - (-9)) \cdot (0,284 \cdot 22,975 + 2 \cdot 0,286 \cdot 26,093 + 2 \cdot 0,275 \cdot 6,322) \\ &= 1246,36 \text{ W} \end{aligned} \quad (31)$$

Faktor smanjenja temperature razlike iznosi[13]:

$$f_{\text{g2}} = \frac{\vartheta_{\text{u,predgr}} - \vartheta_{\text{m,v,god}}}{\vartheta_{\text{u,predgr}} - \vartheta_{\text{v}}} = \frac{41 - 11,4}{41 - (-9)} = 0,592 \quad (32)$$

Karakteristični parametar poda B' iznosi[13]:

$$B' = \frac{A_{\text{pod}}}{0,5 \cdot P} = \frac{22,795}{0,5 \cdot 24,1} = 1,89 \quad (33)$$

Prema iznosu karakterističnog parametra poda B' očitano je ekvivalentni koeficijent prolaza topline prema tipologiji poda, te on iznosi $U_{\text{equiv,pod}} = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. [13]

Transmisijski gubici topline kroz pod sušare na temperaturi predgrijanja iznose:

$$\begin{aligned}\Phi_{T,krov,pod} &= (f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot U_{equiv,k} \cdot A_{pod} \cdot G_w)(\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_v) \\ &= 1,45 \cdot 0,592 \cdot 1,3 \cdot 22,795 \cdot 1 \cdot (41 - (-9)) = 1271,87 \text{ W}\end{aligned}\quad (34)$$

Konačno, ukupni transmisijski gubici topline iznose:

$$\Phi_{T,uk} = \Phi_{T,krov,zid} + \Phi_{T,pod} = 1246,36 + 1271,87 = 2518,23 \text{ W} \quad (35)$$

4.4.2. Proračun snage potrebne za zagrijavanje zraka, piljenica, letvica i greda na temperaturu predgrijanja

Sporo smrzavanje, poput smrzavanja piljenica koje su izložene vanjskom zraku temperature manje od 0°C, značajno pogoršava mehanička svojstva piljenica nakon zagrijavanja [16]. Stoga se pretpostavlja da se piljenice između njihove izrade i sušenja slažu u složaj i temperiraju na temperaturi od 1°C do trenutka sušenja. Temperatura zraka u kontejneru prije početka rada sušare jednaka je temperaturi vanjskog zraka.

Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu proračuna iznose:

- Volumen piljenica $V_{pilj} = 11,34 \text{ m}^3$
- Volumen zraka $V_z = 48,94 \text{ m}^3$
- Volumen letvica $V_{let} = 0,54 \text{ m}^3$
- Volumen greda $V_{greda} = 0,50 \text{ m}^3$
- Početni sadržaj vlage piljenica $X_{pilj} = 90\%$
- Početni sadržaj vlage letvica $X_{let} = 15\%$
- Početni sadržaj vlage greda $X_{greda} = 15\%$
- Gustoća zraka pri srednjoj temperaturi predgrijanja $\rho_z = 1,124 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća hrastovih piljenica na početnom sadržaju vlage $\rho_{hrast} = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća bukovih piljenica na početnom sadržaju vlage $\rho_{bukva} = 865 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća greda i letvica na početnom sadržaju vlage $\rho_{jela} = 450 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku $c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ/(kg K)}$
- Specifični toplinski kapacitet vode $c_w = 4,187 \text{ kJ/(kg K)}$
- Temperatura predgrijanja kontejnera $\vartheta_{u,predgr} = 41 \text{ °C}$
- Vanjska projektna temperatura $\vartheta_v = -9 \text{ °C}$
- Srednja temperatura predgrijanja $\vartheta_{m,predgr} = \frac{\vartheta_{u,predgr} + \vartheta_v}{2} = \frac{41 + (-9)}{2} = 16 \text{ °C}$
- Temperatura temperiranja piljenica $\vartheta_{temp,pilj} = 1 \text{ °C}$

Masa zraka u sušari iznosi:

$$m_z = V_z \cdot \rho_z = 48,94 \cdot 1,124 = 55,01 \text{ kg} \quad (36)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje zraka na temperaturu predgrijanja iznosi:

$$Q_z = m_z \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_v) = 55,01 \cdot 1,005 \cdot (41 - (-9)) = 2764,25 \text{ kJ} \quad (37)$$

Specifični toplinski kapacitet suhe drvene tvari ne ovisi o vrsti drva već ovisi samo o temperaturi drva koje se zagrijava te se računa prema sljedećem izrazu[4]:

$$c_{p,stdrva} = 0,1031 + 0,003867 \cdot T_{m,predgr} = 0,1031 + 0,003867 \cdot 289,15 = 1,22 \text{ kJ/(kg K)} \quad (38)$$

Piljenice u sušari mogu biti od bukve ili od hrasta te njihova masa ovisno o vrsti drva iznosi:

$$m_{pilj,bukva} = V_{pilj} \cdot \rho_{bukva} = 11,34 \cdot 865 = 9809,1 \text{ kg} \quad (39)$$

$$m_{pilj,hrast} = V_{pilj} \cdot \rho_{hrast} = 11,34 \cdot 1025 = 11623,5 \text{ kg} \quad (40)$$

Iz početnog sadržaja vlage moguće je odrediti masu suhe tvari i masu vode sadržane u piljenicama, letvicama i gredama prema sljedećim izrazima[6]:

$$m_{st} = \frac{m}{1 + X} \quad (41)$$

$$m_w = m - m_{st} \quad (42)$$

Masa suhe tvari i vode sadržane u bukvinim piljenicama iznosi:

$$m_{st,bukva} = \frac{m_{pilj,bukva}}{1 + X_{pilj}} = \frac{9809,1}{1 + 0,9} = 5162,68 \text{ kg} \quad (43)$$

$$m_{w,bukva} = m_{pilj,bukva} - m_{st,bukva} = 9809,1 - 5162,68 = 4646,42 \text{ kg} \quad (44)$$

Masa suhe tvari i vode sadržane u hrastovim piljenicama iznosi:

$$m_{st,hrast} = \frac{m_{pilj,hrast}}{1 + X_{pilj}} = \frac{11623,5}{1 + 0,9} = 6117,63 \text{ kg} \quad (45)$$

$$m_{w,hrast} = m_{pilj,hrast} - m_{st,hrast} = 11623,5 - 6117,63 = 5505,87 \text{ kg} \quad (46)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe mase piljenica za slučaj sušenja bukve iznosi:

$$Q_{st,bukva} = m_{st,bukva} \cdot c_{p,stdrva} \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) = 5162,68 \cdot 1,22 \cdot (41 - 1) = 251938,78 \text{ kJ} \quad (47)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u piljenicama za slučaj sušenja bukve iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{w,bukva} &= m_{w,bukva} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 4646,2 \cdot 4,187 \cdot (41 - 1) = 778145,58 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (48)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe mase piljenica za slučaj sušenja hrasta iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{st,hrast} &= m_{st,hrast} \cdot c_{p,stdrva} \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 6117,63 \cdot 1,22 \cdot (41 - 1) = 298540,34 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (49)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u piljenicama za slučaj sušenja hrasta iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{w,hrast} &= m_{w,hrast} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 5505,87 \cdot 4,187 \cdot (41 - 1) = 922123,11 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (50)$$

Masa letvica u sušari iznosi:

$$m_{let} = V_{let} \cdot \rho_{jela} = 0,54 \cdot 450 = 243 \text{ kg} \quad (51)$$

Masa suhe tvari i vode sadržane u letvicama iznosi:

$$m_{st,let} = \frac{m_{let}}{1 + X_{let}} = \frac{243}{1 + 0,15} = 211,30 \text{ kg} \quad (52)$$

$$m_{w,let} = m_{let} - m_{st,let} = 31,70 \text{ kg} \quad (53)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe mase letvica u sušari iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{st,let} &= m_{st,let} \cdot c_{p,stdrva} \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 211,30 \cdot 1,22 \cdot (41 - 1) = 10311,44 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (54)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u letvicama iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{w,let} &= m_{w,let} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 31,70 \cdot 4,187 \cdot (41 - 1) = 5309,12 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (55)$$

Masa greda u sušari iznosi:

$$m_{greda} = V_{greda} \cdot \rho_{jela} = 0,50 \cdot 450 = 225 \text{ kg} \quad (56)$$

Masa suhe tvari i vode sadržane u gredama iznosi:

$$m_{st,greda} = \frac{m_{greda}}{1 + X_{greda}} = \frac{225}{1 + 0,15} = 195,65 \text{ kg} \quad (57)$$

$$m_{w,greda} = m_{greda} - m_{st,greda} = 29,35 \text{ kg} \quad (58)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje suhe mase greda u sušari iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{st,greda} &= m_{st,greda} \cdot c_{p,stdrva} \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 195,65 \cdot 1,22 \cdot (41 - 1) = 9547,72 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (59)$$

Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode sadržane u gredama iznosi:

$$\begin{aligned} Q_{w,greda} &= m_{w,greda} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{u,predgr} - \vartheta_{temp,pilj}) \\ &= 29,35 \cdot 4,187 \cdot (41 - 1) = 4915,54 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (60)$$

4.4.3. Potrebna snaga predgrijača

Izračun potrebne snage predgrijača vrši se prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} \Phi_{predgrijanja} &= \Phi_{T,uk} \\ &+ \frac{Q_z + Q_{st,pilj} + Q_{w,pilj} + Q_{st,let} + Q_{w,let} + Q_{st,greda} + Q_{w,greda}}{t_{predgrijanja}} \end{aligned} \quad (61)$$

Odabrani period predgrijavanja $t_{predgrijanja}$ iznosi 30 sati.[6]

Potrebna snaga predgrijača u slučaju sušenja bukovih piljenica iznosi:

$$\begin{aligned} \Phi_{predgrijanja,bukva} &= \Phi_{T,uk} + \frac{Q_z + Q_{st,bukva} + Q_{w,bukva} + Q_{st,let} + Q_{w,let} + Q_{st,greda} + Q_{w,greda}}{t_{predgrijanja}} \\ &= 2,51823 \\ &+ \frac{2764,25 + 251938,78 + 778145,58 + 10311,44 + 5309,12 + 9547,72 + 4915,54}{30 \cdot 3600} \\ &= 12,36 \text{ kW} \end{aligned} \quad (62)$$

Potrebna snaga predgrijača u slučaju sušenja hrastovih piljenica iznosi:

$$\begin{aligned} \Phi_{predgrijanja,hrast} &= \Phi_{T,uk} + \frac{Q_z + Q_{st,hrast} + Q_{w,hrast} + Q_{st,let} + Q_{w,let} + Q_{st,greda} + Q_{w,greda}}{t_{predgrijanja}} \\ &= 2,51823 \\ &+ \frac{2764,25 + 298540,34 + 922123,11 + 10311,44 + 5309,12 + 9547,72 + 4915,54}{30 \cdot 3600} \\ &= 14,12 \text{ kW} \end{aligned} \quad (63)$$

4.5. Proračun potrebne snage isparivača i kondenzatora

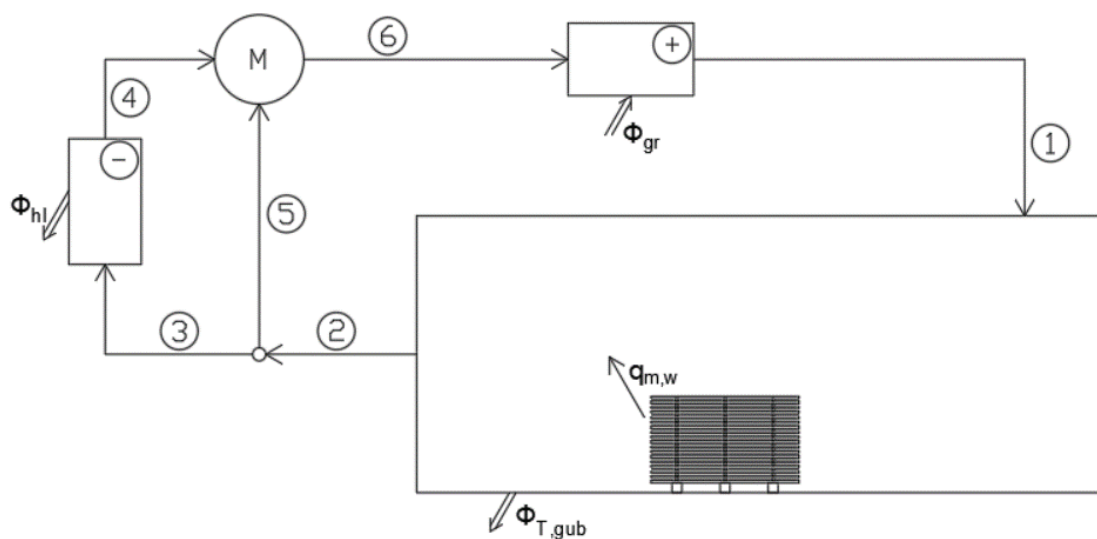
Temperatura i relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru određene su prema režimu sušenja u ovisnosti o trenutačnom sadržaju vlage piljenica. Prolaskom kroz složaje drva zrak piljenicama predaje entalpiju potrebnu za ishlapljivanje vlage te na sebe preuzima ishlapljenu vlagu. Za određivanje stanja zraka na izlasku iz sušare potrebno je znati brzinu sušenja, odnosno koliko

vlage se prenosi sa složaja na zrak. Brzina sušenja se određuje mjerenjem te ovisi o vrsti drva, temperaturi sušenja, brzini strujanja zraka, relativnoj vlažnosti zraka te sadržaju vlage piljenica. Zbog manjka podataka dobivenih mjerenjem ili iz literature, za brzinu sušenja se uzima najveća sigurna brzina sušenja kod koje ne dolazi do grešaka. Za bukvu najveća sigurna brzina sušenja iznosi 4,5% sadržaja vlage u jednom danu, dok je za hrast najveća sigurna brzina sušenja 2,5% sadržaja vlage u jednom danu[17]. Odnosno, najveće sigurne brzine sušenja za bukvu i hrast iznose:

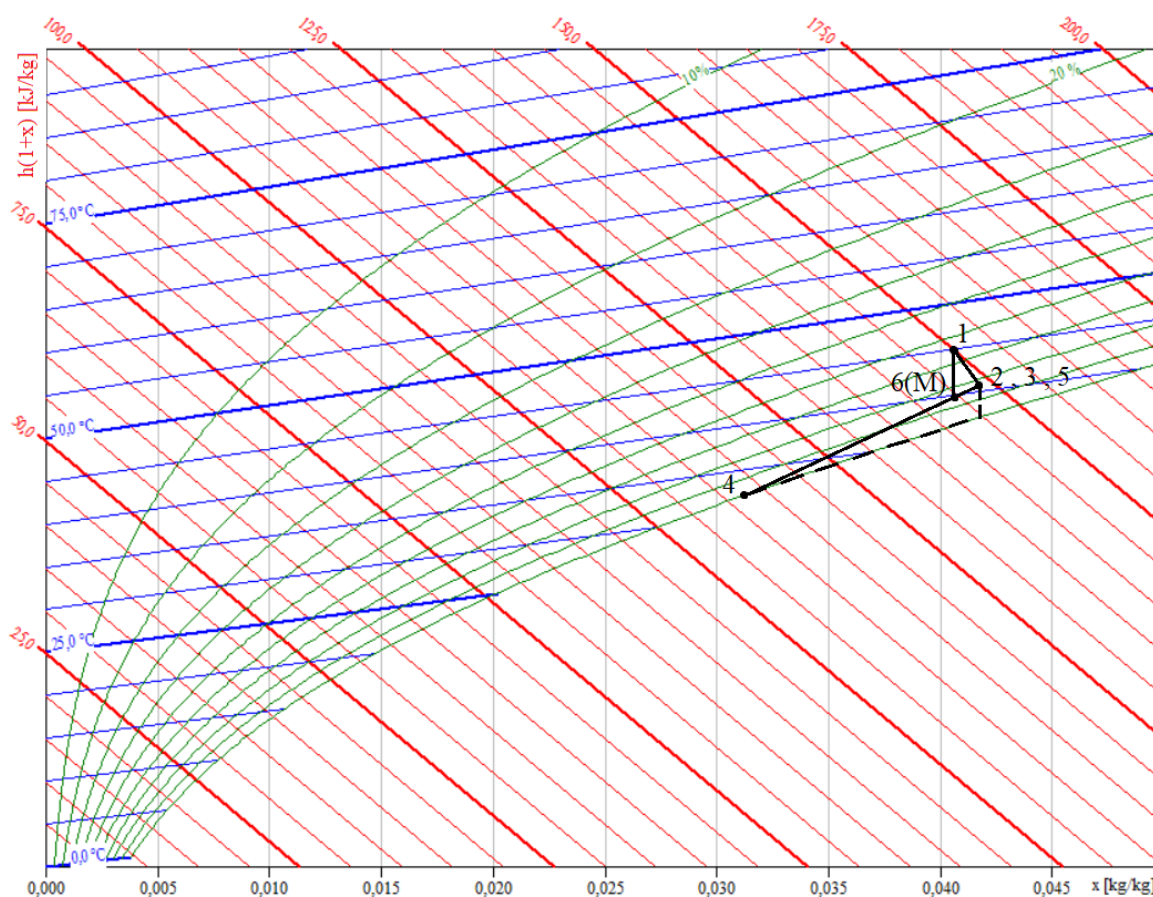
$$\begin{aligned} q_{m,w,bukva} &= m_{st,bukva} \cdot \Delta X_{max,bukva} = 5162,68 \cdot 0,045 \\ &= 232,32 \text{ kg}_w/\text{dan} = 0,002689 \text{ kg}_w/\text{s} \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} q_{m,w,hrast} &= m_{st,hrast} \cdot \Delta X_{max,hrast} = 6117,63 \cdot 0,025 \\ &= 152,04 \text{ kg}_w/\text{dan} = 0,001770 \text{ kg}_w/\text{s} \end{aligned} \quad (65)$$

Nakon što zrak izađe iz sušare, struja zraka se dijeli na dva dijela. Jedan dio zraka se odvodi na isparivač dizalice topline, gdje se hladi ispod točke rosišta te odvlažuje odstranjivanjem nastalog kondenzata. Količina odstranjenog kondenzata jednaka je količini vlage koju je sveukupna struja zraka preuzela prolaskom kroz sušaru. Maseni protok suhog zraka koja se odvaja za prolazak kroz isparivač odabran je tako da se postigne optimum između snage isparivača i iskoristivosti dizalice topline. Naime, smanjenjem masenog protoka suhog zraka na isparivaču smanjuje se potrebna snaga isparivača, međutim smanjuje se i temperatura na koju se zrak mora pothladiti što dovodi do manje iskoristivosti dizalice topline zbog povećanog kompresijskog omjera. Nakon odvlaživanja zrak se ponovo miješa s ostatkom zraka. Mješavina se zatim odvodi na kondenzator dizalice topline, gdje se grije do temperature potrebne na ulazu u sušaru. Shema procesa sušenja prikazana je na slici 20. Tijek procesa u h - x dijagramu za vlažni zrak shematski je prikazan na slici 21. Dijagram prikazan na slici 21. konstruiran je pomoću programskog paketa CoolPack [18].



Slika 20. Shema procesa sušenja

Slika 21. Shematski prikaz procesa u h - x dijagramu

Proračun potrebne snage isparivača i kondenzatora provodi se za tri odabrane radne točke iz režima sušenja. Prva radna točka je na početku procesa, odnosno kada je sadržaj vlage u piljenicama veći od 40%. Druga radna točka se nalazi na točki zasićenja vlakana, odnosno

kada je sadržaj vlage jednak 30%. Treća radna točka je na kraju procesa, odnosno kada je sadržaj vlage 10%.

Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu proračuna potrebne snage isparivača i kondenzatora za radnu točku na početku procesa su:

- Temperatura zraka na ulazu u sušaru – $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru – $\varphi_{r1,1} = 85 \text{ } \%$
- Specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku – $c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku – $c_{p,d} = 1,93 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- Brzina strujanja zraka u složaju – $w_z = 2 \text{ m/s}$
- Specifična toplota isparivanja vodene pare $r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$
- Volumenski protok zraka u sušari – $q_{v,zr} = 21,115 \text{ m}^3/\text{s}$
- Gustoća zraka pri temperaturi $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i atmosferskom tlaku – $\rho_{r1,1} = 1,125 \text{ kg/m}^3$

Stanje zraka 1:

Stanje zraka 1 ovisi o režimu sušenja te je identično za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta. Parcijalni tlak vodene pare u stanju zasićenja na temperaturi $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iznosi[19]:

$$p_{r1,s1} = 7616,2 \text{ Pa} \quad (66)$$

Parcijalni tlak vodene pare na temperaturi $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti $\varphi_{r1,1} = 85 \text{ } \%$ iznosi:

$$p_{r1,1} = \varphi_{r1,1} \cdot p_{r1,s1} = 0,85 \cdot 7616,2 = 6473,77 \text{ Pa} \quad (67)$$

Sadržaj vlage zraka na temperaturi $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti $\varphi_{r1,1} = 85 \text{ } \%$ iznosi:

$$x_{r1,1} = \frac{0,622 \cdot p_{r1,1}}{p_{\text{atm}} - p_{r1,1}} = \frac{0,622 \cdot 6473,77}{101325 - 6473,77} = 0,04245 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (68)$$

Specifična entalpija zraka na temperaturi $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti $\varphi_{r1,1} = 85 \text{ } \%$ iznosi:

$$\begin{aligned} h_{(1+x)r1,1} &= c_{p,z} \cdot \vartheta_{r1,1} + x_{r1,1} (r_0 + c_{p,d} \cdot \vartheta_{r1,1}) \\ &= 1,005 \cdot 40,6 + 0,04245 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 40,6) \\ &= 150,25 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (69)$$

Maseni protok vlažnog zraka na ulazu u sušaru iznosi:

$$q_{m,zr,r1,1} = q_{v,zr,r1,1} \cdot \rho_{r1,1} = 21,115 \cdot 1,125 = 23,75 \text{ kg/s} \quad (70)$$

Maseni protok suhog zraka na ulazu u sušaru iznosi:

$$q_{m,sz,r1,1} = \frac{q_{m,zr,r1,1}}{1 + x_{r1,1}} = \frac{23,75}{1 + 0,04245} = 22,78 \text{ kg/s} \quad (71)$$

Stanje zraka 2 u slučaju sušenja bukve:

Promjena specifične entalpije zraka prolaskom kroz složaj jednaka je zbroju topline koje se troši na ishlapljivanje i toplinskih gubitaka kroz ovojnicu sušare. Međutim, zbog malog iznosa topline koja se troši na ishlapljivanje opravdano ju je zanemariti, te je promjena specifične entalpije u tome slučaju jednaka toplinskim gubicima kroz ovojnicu sušare. Toplinski gubici za unutarnju temperaturu zraka $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ °C}$ i brzinu strujanja $w_z = 2 \text{ m/s}$ računaju se prema postupku koji je opisan u poglavlju 4.4.1. te iznose:

$$\Phi_{T,uk,r1,b} = 2,583 \text{ kW} \quad (72)$$

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$q_{m,sz,r1,b,2} = q_{m,zr,r1,1} = 22,78 \text{ kg/s} \quad (73)$$

Specifična entalpija zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$h_{(1+x)r1,b,2} = h_{(1+x)r1,1} - \frac{\Phi_{T,uk,r1,b}}{q_{m,sz,r1,b,2}} = 150,25 - \frac{2,583}{22,78} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (74)$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz sušare računa se iz bilance vlage sušare te iznosi:

$$x_{r1,b,2} = x_{r1,1} + \frac{q_{m,w,bukva}}{q_{m,sz,r1,b,2}} = 0,04245 + \frac{0,002689}{22,78} = 0,04257 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (75)$$

Temperatura zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$\vartheta_{r1,b,2} = \frac{h_{(1+x)r1,b,2} - x_{r1,b,2} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,b,2} \cdot c_{p,d}} = \frac{150,14 - 0,04257 \cdot 2500}{1,005 + 0,04257 \cdot 1,93} = 40,21 \text{ °C} \quad (76)$$

Stanje zraka 3 u slučaju sušenja bukve:

Maseni protok suhog zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$q_{m,sz,r1,b,3} = 0,5 \text{ kg/s (odabrana vrijednost)} \quad (77)$$

Specifična entalpija zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$h_{(1+x)r1,b,3} = h_{(1+x)r1,b,2} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (78)$$

Sadržaj vlage zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$x_{r1,b,3} = x_{r1,b,2} = 0,04257 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (79)$$

Temperatura zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$\vartheta_{r1,b,3} = \vartheta_{r1,b,2} = 40,21 \text{ °C} \quad (80)$$

Stanje zraka 4 u slučaju sušenja bukve:

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$q_{m,sz,r1,b,4} = q_{m,sz,r1,b,3} = 0,5 \text{ kg/s} \quad (81)$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$\begin{aligned} x_{r1,b,4} &= x_{r1,b,3} - \frac{q_{m,w,bukva}}{q_{m,sz,r1,b,4}} = 0,04257 - \frac{0,002689}{0,5} \\ &= 0,037192 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \end{aligned} \quad (82)$$

Pošto na isparivaču dolazi do izdvajanja vlage, zrak je na izlazu iz isparivača u stanju zasićenja. Specifična entalpija zraka u stanju zasićenja na sadržaju vlage $x_{r1,b,4} = 0,037192 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$ iznosi[19]:

$$h_{(1+x)r1,b,4} = 130,74 \text{ kJ/kg} \quad (83)$$

Temperatura zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$\begin{aligned} \vartheta_{r1,b,4} &= \frac{h_{(1+x)r1,b,4} - x_{r1,b,4} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,b,4} \cdot c_{p,d}} = \frac{130,74 - 0,037192 \cdot 2500}{1,005 + 0,037192 \cdot 1,93} \\ &= 35,07 \text{ °C} \end{aligned} \quad (84)$$

Stanje zraka 5 u slučaju sušenja bukve:

Maseni protok suhog zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$q_{m,sz,r1,b,5} = q_{m,sz,r1,b,2} - q_{m,sz,r1,b,4} = 22,78 - 0,5 = 22,28 \text{ kg/s} \quad (85)$$

Specifična entalpija zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$h_{(1+x)r1,b,5} = h_{(1+x)r1,b,2} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (86)$$

Sadržaj vlage zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$x_{r1,b,5} = x_{r1,b,2} = 0,04257 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (87)$$

Temperatura zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$\vartheta_{r1,b,5} = \vartheta_{r1,b,2} = 40,21 \text{ °C} \quad (88)$$

Stanje zraka 6 u slučaju sušenja bukve:

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$q_{m,sz,r1,b,6} = q_{m,sz,r1,b,4} + q_{m,sz,r1,b,5} = 0,5 + 22,28 = 22,78 \text{ kg/s} \quad (89)$$

Specifična entalpija zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$h_{(1+x)r1,b,6} = \frac{q_{m,sz,r1,b,4} \cdot h_{(1+x)r1,b,4} + q_{m,sz,r1,b,5} \cdot h_{(1+x)r1,b,5}}{q_{m,sz,r1,b,6}} \quad (90)$$

$$= \frac{0,5 \cdot 130,74 + 22,28 \cdot 150,14}{22,78} = 149,71 \text{ kJ/kg}$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$x_{r1,b,6} = \frac{q_{m,sz,r1,b,4} \cdot x_{r1,b,4} + q_{m,sz,r1,b,5} \cdot x_{r1,b,5}}{q_{m,sz,r1,b,6}} \quad (91)$$

$$= \frac{0,5 \cdot 0,037192 + 22,28 \cdot 0,04257}{22,78} = 0,04245 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$$

Temperatura zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$\vartheta_{r1,b,6} = \frac{h_{(1+x)r1,b,6} - x_{r1,b,6} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,b,6} \cdot c_{p,d}} = \frac{149,71 - 0,04245 \cdot 2500}{1,005 + 0,04245 \cdot 1,93} \quad (92)$$

$$= 40,01 \text{ °C}$$

Potrebna snaga isparivača u radnoj točki na početku procesa u slučaju sušenja bukovih piljenica iznosi:

$$\Phi_{HL,r1,b} = q_{m,sz,r1,b,4} \cdot (h_{(1+x)r1,b,4} - h_{(1+x)r1,b,3}) \quad (93)$$

$$= 0,5 \cdot (130,74 - 150,14) = 9,7 \text{ kW}$$

Potrebna snaga kondenzatora u radnoj točki na početku procesa u slučaju sušenja bukovih piljenica iznosi:

$$\Phi_{GR,r1,b} = q_{m,sz,r1,b,6} \cdot (h_{(1+x)r1,b,1} - h_{(1+x)r1,b,6}) \quad (94)$$

$$= 22,78 \cdot (150,25 - 149,71) = 12,30 \text{ kW}$$

Stanje zraka 2 u slučaju sušenja hrasta:

Toplinski gubici za unutarnju temperaturu zraka $\vartheta_{r1,1} = 40,6 \text{ °C}$ i brzinu strujanja $w_z = 2 \text{ m/s}$ računaju se prema postupku koji je opisan u poglavlju 4.4.1. te iznose:

$$\Phi_{T,uk,r1,h} = 2,583 \text{ kW} \quad (95)$$

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$q_{m,sz,r1,h,2} = q_{m,zr,r1,1} = 22,78 \text{ kg/s} \quad (96)$$

Specifična entalpija zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$h_{(1+x)r1,h,2} = h_{(1+x)r1,1} - \frac{\Phi_{T,uk,r1,h}}{q_{m,sz,r1,h,2}} = 150,25 - \frac{2,583}{22,78} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (97)$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz sušare računa se iz bilance vlage sušare te iznosi:

$$x_{r1,h,2} = x_{r1,1} + \frac{q_{m,w,hrast}}{q_{m,sz,r1,h,2}} = 0,04245 + \frac{0,001770}{22,78} = 0,04253 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (98)$$

Temperatura zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$\vartheta_{r1,h,2} = \frac{h_{(1+x)r1,h,2} - x_{r1,h,2} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,h,2} \cdot c_{p,d}} = \frac{150,14 - 0,04253 \cdot 2500}{1,005 + 0,04253 \cdot 1,93} = 40,31 \text{ °C} \quad (99)$$

Stanje zraka 3 u slučaju sušenja hrasta:

Maseni protok suhog zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$q_{m,sz,r1,h,3} = 1,25 \text{ kg/s (odabrana vrijednost)} \quad (100)$$

Specifična entalpija zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$h_{(1+x)r1,h,3} = h_{(1+x)r1,h,2} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (101)$$

Sadržaj vlage zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$x_{r1,h,3} = x_{r1,h,2} = 0,04253 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (102)$$

Temperatura zraka na izlazu iz sušare iznosi:

$$\vartheta_{r1,h,3} = \vartheta_{r1,h,2} = 40,31 \text{ °C} \quad (103)$$

Stanje zraka 4 u slučaju sušenja hrasta:

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$q_{m,sz,r1,h,4} = q_{m,sz,r1,h,3} = 1,25 \text{ kg/s} \quad (104)$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$\begin{aligned} x_{r1,h,4} &= x_{r1,h,3} - \frac{q_{m,w,hrast}}{q_{m,sz,r1,h,4}} = 0,04253 - \frac{0,001770}{1,25} \\ &= 0,041114 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \end{aligned} \quad (105)$$

Pošto na isparivaču dolazi do izdvajanja vlage, zrak je na izlazu iz isparivača u stanju zasićenja.

Specifična entalpija zraka u stanju zasićenja na sadržaju vlage $x_{r1,h,4} = 0,041114 \text{ kg/kg}$ iznosi[19]:

$$h_{(1+x)r1,h,4} = 142,67 \text{ kJ/kg} \quad (106)$$

Temperatura zraka na izlazu iz isparivača iznosi:

$$\begin{aligned} \vartheta_{r1,h,4} &= \frac{h_{(1+x)r1,h,4} - x_{r1,h,4} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,h,4} \cdot c_{p,d}} = \frac{142,67 - 0,041114 \cdot 2500}{1,005 + 0,041114 \cdot 1,93} \\ &= 36,78 \text{ °C} \end{aligned} \quad (107)$$

Stanje zraka 5 u slučaju sušenja hrasta:

Maseni protok suhog zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$q_{m,sz,r1,h,5} = q_{m,sz,r1,h,2} - q_{m,sz,r1,h,4} = 22,78 - 1,25 = 21,53 \text{ kg/s} \quad (108)$$

Specifična entalpija zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$h_{(1+x)r1,h,5} = h_{(1+x)r1,h,2} = 150,14 \text{ kJ/kg} \quad (109)$$

Sadržaj vlage zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$x_{r1,h,5} = x_{r1,h,2} = 0,04253 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (110)$$

Temperatura zraka na ulazu u mješalište iznosi:

$$\vartheta_{r1,h,5} = \vartheta_{r1,h,2} = 40,31 \text{ °C} \quad (111)$$

Stanje zraka 6 u slučaju sušenja hrasta:

Maseni protok suhog zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$q_{m,sz,r1,h,6} = q_{m,sz,r1,h,4} + q_{m,sz,r1,h,5} = 1,25 + 21,53 = 22,78 \text{ kg/s} \quad (112)$$

Specifična entalpija zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$\begin{aligned} h_{(1+x)r1,h,6} &= \frac{q_{m,sz,r1,h,4} \cdot h_{(1+x)r1,h,4} + q_{m,sz,r1,h,5} \cdot h_{(1+x)r1,h,5}}{q_{m,sz,r1,h,6}} \\ &= \frac{1,25 \cdot 142,67 + 21,53 \cdot 150,14}{22,78} = 149,73 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (113)$$

Sadržaj vlage zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$\begin{aligned} x_{r1,h,6} &= \frac{q_{m,sz,r1,h,4} \cdot x_{r1,h,4} + q_{m,sz,r1,h,5} \cdot x_{r1,h,5}}{q_{m,sz,r1,h,6}} \\ &= \frac{1,25 \cdot 0,041114 + 21,53 \cdot 0,04253}{22,78} = 0,04245 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \end{aligned} \quad (114)$$

Temperatura zraka na izlazu iz mješališta iznosi:

$$\begin{aligned} \vartheta_{r1,h,6} &= \frac{h_{(1+x)r1,h,6} - x_{r1,h,6} \cdot r_0}{c_{p,z} + x_{r1,h,6} \cdot c_{p,d}} = \frac{149,73 - 0,04245 \cdot 2500}{1,005 + 0,04245 \cdot 1,93} \\ &= 40,12 \text{ °C} \end{aligned} \quad (115)$$

Potrebna snaga isparivača u radnoj točki na početku procesa u slučaju sušenja hrastovih piljenica iznosi:

$$\begin{aligned} \Phi_{HL,r1,h} &= q_{m,sz,r1,h,4} \cdot (h_{(1+x)r1,h,4} - h_{(1+x)r1,h,3}) \\ &= 1,25 \cdot (142,67 - 150,14) = 9,34 \text{ kW} \end{aligned} \quad (116)$$

Potrebna snaga kondenzatora u radnoj točki na početku procesa u slučaju sušenja hrastovih piljenica iznosi:

$$\begin{aligned}\Phi_{GR,r1,h} &= q_{m,sz,r1,h,6} \cdot (h_{(1+x)r1,h,1} - h_{(1+x)r1,h,6}) \\ &= 22,78 \cdot (150,25 - 149,73) = 11,8456 \text{ kW}\end{aligned}\quad (117)$$

Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu proračuna potrebne snage isparivača i kondenzatora za radnu točku koja se nalazi na točki zasićenja vlakanaca:

- Temperatura zraka na ulazu u sušaru – $\vartheta_{r2,1} = 46,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru – $\varphi_{r2,1} = 75 \text{ } \%$
- Specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku – $c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$
- Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku – $c_{p,d} = 1,93 \text{ kJ/kgK}$
- Brzina strujanja zraka u složaju – $w_z = 2 \text{ m/s}$
- Specifična toplota isparavanja vodene pare $r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$
- Volumenski protok zraka u sušari – $q_{v,zr} = 21,115 \text{ m}^3/\text{s}$
- Gustoća zraka pri temperaturi $\vartheta_{r2,1} = 46,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\rho_{r2,1} = 1,106 \text{ kg/m}^3$
- Maseni protok zraka $q_{m,zr,r2,1} = q_{v,zr} \cdot \rho_{r2,1} = 21,115 \cdot 1,106 = 23,35 \text{ kg/s}$
- Maseni protok suhog zraka $q_{m,sz,r2,1} = 22,24 \text{ kg/s}$

Proračun stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na točki zasićenja vlakanaca provodi se isto kao i proračun stanja zraka za radnu točku na početku procesa. Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na točki zasićenja vlakanaca u slučaju sušenja bukovih i hrastovih piljenica prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na točki zasićenja vlakanaca za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta

Radna točka 2 (točka zasićenja vlakanaca)	Stanje 1 (izlaz iz kondenzatora /ulazu komoru sa sušenje)	Stanje 2 (izlaz iz komore za sušenje)	Stanje 3 (ulaz u isparivač dizalice topline)	Stanje 4 (izlaz iz isparivača dizalice topline)	Stanje 5 (ulaz zraka u mješalište)	Stanje 6 (izlaz zraka iz mješališta/ ulaz zraka u kondenzator dizalice topline)
Bukva						
$\vartheta_{r2,b,i}$ [°C]	46,1	45,69	45,69	35,99	45,69	45,59
$h_{(1+x)r2,b,i}$ [kJ/kg]	175,52	175,39	175,39	137,06	175,39	174,95
$x_{r2,b,i}$ [kg _w /kg _{sz}]	0,0498996	0,0500205	0,0500205	0,0392649	0,0500205	0,0498996
Hrast						
$\vartheta_{r2,h,i}$ [°C]	46,1	45,79	45,79	39,31	45,79	45,57
$h_{(1+x)r2,h,i}$ [kJ/kg]	175,52	175,39	175,39	162,17	175,39	174,94
$x_{r2,h,i}$ [kg _w /kg _{sz}]	0,0498996	0,0499791	0,0499791	0,0476190	0,0499791	0,0498996

Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu proračuna potrebne snage isparivača i kondenzatora za radnu točku na kraju procesa su:

- Temperatura zraka na ulazu u sušaru – $\vartheta_{r3,1} = 57,2$ °C
- Relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru – $\varphi_{r3,1} = 40$ %
- Specifični toplinski kapacitet zraka pri konstantnom tlaku – $c_{p,z} = 1,005$ kJ/kgK
- Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku – $c_{p,d} = 1,93$ kJ/kgK
- Brzina strujanja zraka u složaju – $w_z = 2$ m/s
- Specifična toplota isparavanja vodene pare $r_0 = 2500$ kJ/kg

- Volumenski protok zraka u sušari – $q_{v,zr} = 21,115 \text{ m}^3/\text{s}$
- Gustoća zraka pri temperaturi $\vartheta_{r3,1} = 57,2 \text{ °C}$ – $\rho_{r3,1} = 1,069 \text{ kg/m}^3$
- Maseni protok zraka $q_{m,zr,r3,1} = q_{v,zr} \cdot \rho_{r3,1} = 21,115 \cdot 1,069 = 22,57 \text{ kg/s}$
- Maseni protok suhog zraka $q_{m,sz,r3,1} = 21,58 \text{ kg/s}$

Proračun stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na kraju procesa provodi se isto kao i proračun stanja zraka za radnu točku na početku procesa. Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na kraju procesa u slučaju sušenja bukovih i hrastovih piljenica prikazana su u tablici 8.

Tablica 8. Stanja zraka u karakterističnim točkama za radnu točku na kraju procesa za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta

Radna točka 2 (točka zasićenja vlakanaca)	Stanje 1 (izlaz iz kondenzatora /ulazu komoru sa sušenje)	Stanje 2 (izlaz iz komore za sušenje)	Stanje 3 (ulaz u isparivač dizalice topline)	Stanje 4 (izlaz iz isparivača dizalice topline)	Stanje 5 (ulaz zraka u mješalište)	Stanje 6 (izlaz zraka iz mješališta/ ulaz zraka u kondenzator dizalice topline)
Bukva						
$\vartheta_{r2,b,i} \text{ [°C]}$	57,2	56,74	56,74	34,27	56,74	56,49
$h_{(1+x)r2,b,i} \text{ [kJ/kg]}$	177,83	177,66	177,66	125,47	177,66	177,05
$x_{r2,b,i} \text{ [kg}_w\text{/kg}_{sz}]$	0,0461023	0,0462269	0,0462269	0,0354714	0,0462269	0,0461023
Hrast						
$\vartheta_{r2,h,i} \text{ [°C]}$	57,2	56,84	56,84	35,92	56,84	56,61
$h_{(1+x)r2,h,i} \text{ [kJ/kg]}$	177,83	177,66	177,66	136,57	177,66	177,18
$x_{r2,h,i} \text{ [kg}_w\text{/kg}_{sz}]$	0,0461023	0,0461844	0,0461844	0,0391038	0,0461844	0,0461023

Proračun potrebne snage isparivača i kondenzatora za radnu točku koja se nalazi na točki zasićenja vlakanaca i za radnu točku na kraju procesa provodi se isto kao i za radnu točku na

početku procesa. Rezultati potrebnih snaga isparivača i kondenzatora za sve tri radne točke prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati proračuna potrebnih snaga isparivača i kondenzatora u odabranim radnim točkama za slučaj sušenja bukve i za slučaj sušenja hrasta

Vrsta drva	Temperatura zraka na ulazu u sušaru [°C]	Relativna vlažnost zraka na ulazu u sušaru [%]	Protok zraka na isparivaču dizalice topline [kg/s]	Potrebna snaga isparivača [kW]	Potrebna snaga kondenzatora [kW]
Bukva	40,6	85	0,5	9,70	12,30
	46,1	75	0,25	9,58	12,55
	57,2	40	0,25	13,05	16,80
Hrast	40,6	85	1,25	9,34	11,85
	46,1	75	0,75	9,91	12,88
	57,2	40	0,25	10,27	14,06

4.6. Dimenzioniranje komponenti dizalice topline

Dimenzioniranje komponenti dizalice topline radi se za radnu točku na kraju procesa u slučaju sušenja bukovih piljenica. Radna točka na kraju procesa u slučaju sušenja bukovih piljenica je odabrana kao kritična točka iz sljedećih razloga:

1. U odabranoj radnoj točki potrebna snaga isparivača je najveća
2. U odabranoj radnoj točki je najveća razlika između temperature zraka koja se treba postići na kondenzatoru i isparivaču. Odnosno, u odabranoj točki je najveća razlika između temperature kondenzacije i isparivanja radne tvari te je posljedično potrebna najveća snaga kompresora.

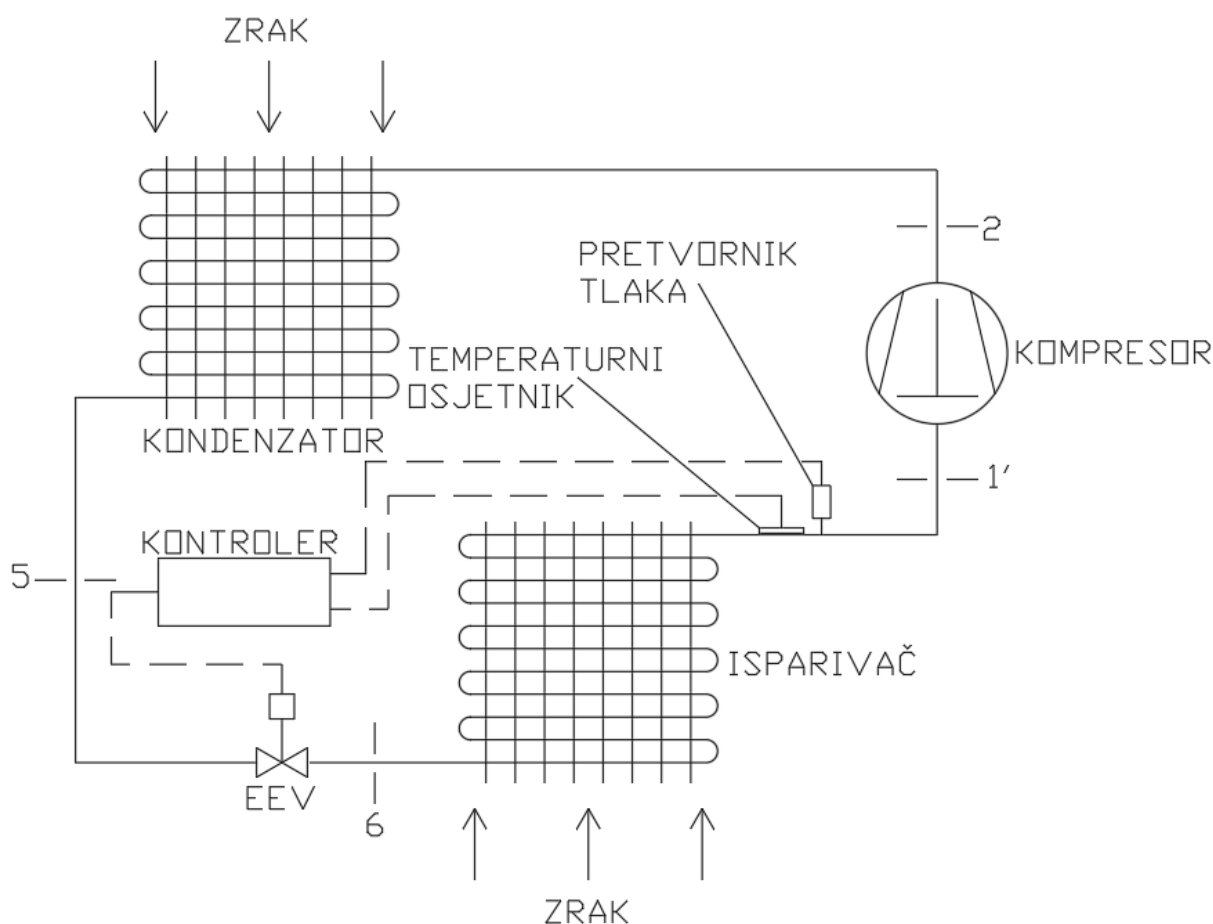
Poznate veličine i parametri potrebni za provedbu dimenzioniranja komponenti dizalice topline iznose:

- Radna tvar dizalice topline – R-134a
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 69\text{ °C}$
- Temperatura isparivanja $\vartheta_i = 30\text{ °C}$

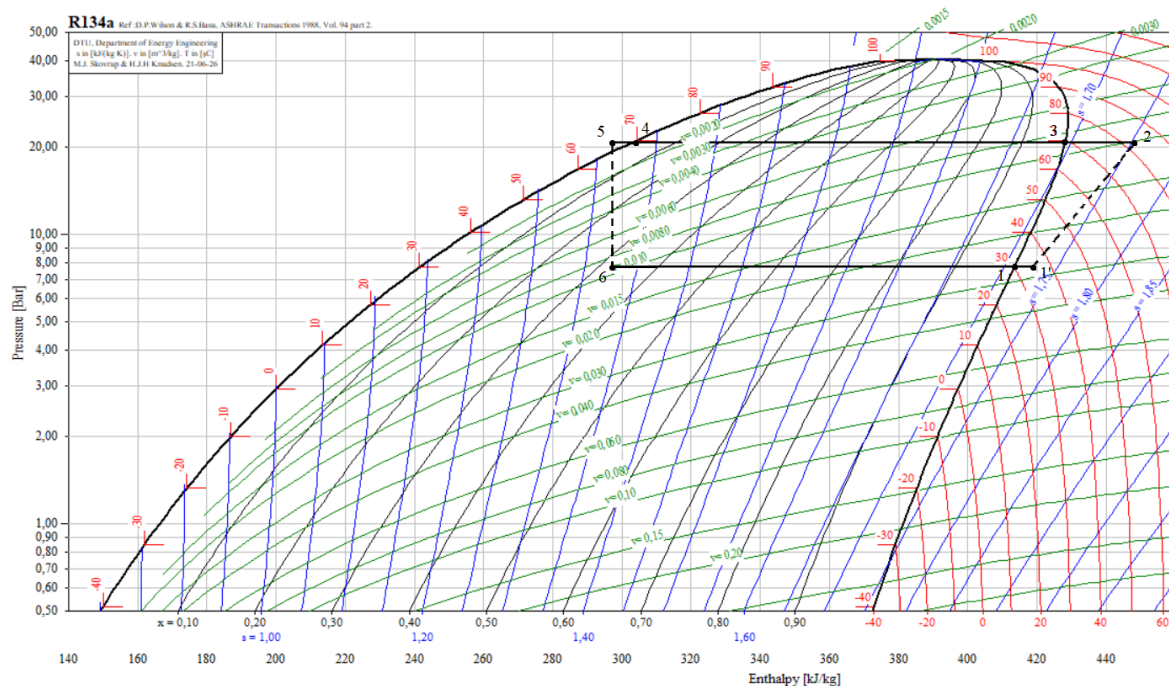
- Pregrijanje radne tvari $\Delta\vartheta_{pr} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Pothlađenje radne tvari $\Delta\vartheta_{po} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Potrebna snaga isparivača $\Phi_{isp} = 13,05\text{ kW}$
- Potrebna snaga kondenzatora $\Phi_{kond} = 16,80\text{ kW}$
- Izentropski stupanj djelovanja kompresora $\eta_{iz} = 0,7$ (iskustvena vrijednost)

S obzirom na temperature zraka na izlazu iz isparivača odnosno na izlazu iz kondenzatora odabrane su temperatura isparivanja i kondenzacije tako da bi se osigurala srednja logaritamska temperaturna razlika unutar preporučenog raspona.

Na temelju ulaznih podataka određuju se karakteristične točke dizalice topline. Shema dizalice topline zrak-zrak prikazana je na slici 22. Tijek procesa prikazan je na $\log p-h$ dijagramu na slici 23. Dijagram prikazan na slici 23. je konstruiran pomoću programskog paketa CoolPack.



Slika 22. Shematski prikaz dizalice topline zrak-zrak



Slika 23. Tijek procesa dizalice topline zrak-zrak u $\log p$ - h dijagramu

Svojstva radne tvari R-134a u karakterističnim točkama očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te su prikazana u tablici 8.

Tablica 10. Svojstva radne tvari u karakterističnim točkama procesa dizalice topline

	Temperatura radne tvari [°C]	Tlak radne tvari [bar]	Specifična entalpija [kJ/kg]	Specifična entropija [kJ/(kg K)]
1	30	7,70196	414,819	1,7145
1'	35	7,70196	420,080	1,7317
2s	77,36	20,69846	440,731	1,7317
2	84,01	20,69846	449,581	1,7567
3	69	20,69846	428,516	1,6964
4	69	20,69846	302,555	1,3283
5	66	20,69846	297,289	1,3128
6	30	7,70196	297,289	1,3268

Entalpija točke 2 određuje se pomoću izentropskog stupnja djelovanja kompresora na sljedeći način:

$$h_2 = h_{1'} + \frac{h_{2s} - h_{1'}}{\eta_{is}} = 420,080 + \frac{440,731 - 420,080}{0,7} = 449,581 \text{ kJ/kg} \quad (118)$$

Protok radne tvari se računa prema potrebnoj snazi isparivača pošto je odvlaživanje koje se odvija na isparivaču primarna funkcija dizalice topline. Protok radne tvari u krugu dizalice topline iznosi:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_{isp}}{h_{1'} - h_6} = \frac{13,05}{420,080 - 297,289} = 0,10628 \text{ kg/s} \quad (119)$$

Potrebna snaga kompresora dizalice topline iznosi:

$$P_{komp} = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_{1'}) = 0,10628 \cdot (449,581 - 420,080) = 3,14 \text{ kW} \quad (120)$$

Snaga kondenzatora dizalice topline iznosi:

$$\Phi_{kond} = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_5) = 0,10628 \cdot (449,581 - 297,289) = 16,19 \text{ kW} \quad (121)$$

Izračunata snaga kondenzatora ne zadovoljava potrebnu snagu kondenzatora iz tablice 9. Stoga, u krajnjoj točki procesa uz kondenzator dizalice topline potrebno je koristiti pomoćne grijače. Kondenzator dizalice topline nadoknađuje samo toplinske gubitke komore za sušenje, stoga se pomoćni grijači koriste samo kada su vanjski gubitci topline bliski projektnim. Nadalje, snaga kondenzatora je dovoljna za barem djelomično predgrijavanje komore za sušenje u predviđenom vremenskom periodu, stoga je moguće iskoristiti dizalicu topline za predgrijavanje komore za sušenje tako da se osigura protok vanjskog zraka preko isparivača dizalice topline. Međutim, zbog jednostavnosti izvedbe ovaj slučaj nije razmatran u rješenju te su odabrani električni grijači zraka.

Faktor hlađenja dizalice topline iznosi:

$$\varepsilon_{hl} = \frac{\Phi_{isp}}{P_{komp}} = \frac{13,05}{3,14} = 4,16 \quad (122)$$

Sveukupni faktor učinkovitosti (rashladno-ogrjevnog procesa):

$$\varepsilon_{uk} = \frac{\Phi_{isp} + \Phi_{kond}}{P_{komp}} = \frac{13,05 + 16,19}{3,14} = 9,31 \quad (123)$$

4.6.1. Dimenzioniranje cjevovoda dizalice topline

Proračun dimenzija cjevovoda se provodi za sljedeće dionice:

- Usisni vod (od isparivača do kompresora)
- Tlačni vod (od kompresora do kondenzatora)
- Kapljevinski vod (od kondenzatora do EEV-a)

Fizikalna svojstva radne tvari potrebna za dimenzioniranje cjevovoda očitana su pomoću programskog paketa CoolProp.

4.6.1.1. Usisni vod

Gustoća radne tvari na usisu u kompresor, stanje 1':

$$\rho_{RT,1'} = 36,376 \text{ kg/m}^3 \quad (124)$$

Volumenski protok radne tvari:

$$q_{V,RT,1'} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,1'}} = \frac{0,10628}{36,376} = 0,00292 \text{ m}^3/\text{s} \quad (125)$$

Tipični raspon brzina strujanja (orijentacijske vrijednosti) za radnu tvar R134a u usisnom vodu kod manjih uređaja iznosi 4-9 m/s. Stoga je pretpostavljena brzina strujanja:

$$w_{\text{pretp},1'} = 6,5 \text{ m/s}$$

Promjer cijevi usisnog voda:

$$d_{u,1'} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{V,RT,1'}}{\pi \cdot w_{\text{pretp},1'}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00292}{\pi \cdot 6,5}} = 0,0239 \text{ m} \quad (126)$$

Odabrana je sljedeća bakrena cijev[20]:

$$\text{Cu } \varnothing 28 \times 1,5 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja u cjevovodu:

$$w_{\text{stv},1'} = \frac{4 \cdot q_{V,RT,1'}}{d_{u,1'}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,00292}{0,025^2 \cdot \pi} = 5,95 \text{ m/s} \quad (127)$$

4.6.1.2. Tlačni vod

Gustoća radne tvari na izlazu iz kompresora, stanje 2:

$$\rho_{RT,2} = 96,604 \text{ kg/m}^3 \quad (128)$$

Volumenski protok radne tvari:

$$q_{V,RT,2} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,2}} = \frac{0,10628}{96,604} = 0,00110 \text{ m}^3/\text{s} \quad (129)$$

Tipični raspon brzina strujanja (orijentacijske vrijednosti) za radnu tvar R134a u tlačnom vodu kod manjih uređaja iznosi 8-11 m/s. Stoga je pretpostavljena brzina strujanja:

$$w_{\text{pretp},2} = 9,5 \text{ m/s}$$

Promjer cijevi tlačnog voda:

$$d_{u,2} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{V,RT,2}}{\pi \cdot w_{\text{pretp},2}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00110}{\pi \cdot 9,5}} = 0,0121 \text{ m} \quad (130)$$

Odabrana je sljedeća bakrena cijev[20]:

$$Cu \text{ } \varnothing 14 \times 1 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja u cjevovodu:

$$w_{\text{stv},2} = \frac{4 \cdot q_{V,RT,2}}{d_{u,2}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,00110}{0,012^2 \cdot \pi} = 9,73 \text{ m/s} \quad (131)$$

4.6.1.3. Kapljevinski vod

Gustoća radne tvari na izlazu iz kondenzatora, stanje 5:

$$\rho_{RT,5} = 1022,426 \text{ kg/m}^3 \quad (132)$$

Volumenski protok radne tvari:

$$q_{V,RT,5} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{RT,5}} = \frac{0,10628}{1022,426} = 0,0001039 \text{ m}^3/\text{s} \quad (133)$$

Tipični raspon brzina strujanja (orijentacijske vrijednosti) za radnu tvar R134a u kapljevinskom vodu kod manjih uređaja iznosi 0,4-0,8 m/s. Stoga je pretpostavljena brzina strujanja:

$$w_{\text{pretp},5} = 0,6 \text{ m/s}$$

Promjer cijevi kapljevinskog voda:

$$d_{u,5} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0001039}{\pi \cdot 0,6}} = 0,0148 \text{ m} \quad (134)$$

Odabrana je sljedeća bakrena cijev[20]:

$$Cu \text{ } \varnothing 16 \times 0,75 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja u cjevovodu:

$$w_{stv,5} = \frac{4 \cdot q_{V,RT,5}}{d_{u,5}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,0001039}{0,0145^2 \cdot \pi} = 0,629 \text{ m/s} \quad (135)$$

4.6.2. Dimenzioniranje zrakom hlađenog kondenzatora

Proračun zrakom hlađenog kondenzatora proveden je prema Ciconkovu [21]. Proračun je iterativan te je u ovom poglavlju prikazan proračun sa zadnjom iteracijom.

Ulazni parametri potrebni za proračun zrakom hlađenog kondenzatora iznose:

- Učin kondenzatora – $\Phi_{kond} = 16,19 \text{ kW}$
- Ulazna temperatura zraka – $\vartheta_{zr1} = 56,49 \text{ °C}$
- Specifična entalpija vlažnog zraka na ulazu u kondenzator – $h_{(1+x)zr1} = 177,05 \text{ kJ/kg}$
- Sadržaj vlage zraka na ulazu u kondenzator – $x_{zr1} = 0,046102 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$
- Temperatura pregrijanja (Temperatura radne tvari na ulazu u kondenzator) – $\vartheta_{preg} = 84,01 \text{ °C}$
- Radna tvar – R134a
- Temperatura kondenzacije – $\vartheta_k = 69 \text{ °C}$
- Temperatura na izlazu iz kondenzatora – $\vartheta_{pothl} = 66 \text{ °C}$
- Volumenski protok zraka – $q_{V,zr} = 21,115 \text{ m}^3/\text{s}$
- Maseni protok zraka – $q_{m,zr} = 22,570 \text{ kg/s}$
- Maseni protok suhog zraka – $q_{m,sz} = 21,58 \text{ kg/s}$
- Protok radne tvari – $q_{m,RT} = 0,10628 \text{ kg/s}$
- Specifični toplinski kapacitet suhog zraka pri konstantnom tlaku – $c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$
- Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku – $c_{p,d} = 1,93 \text{ kJ/kgK}$
- Specifična toplina isparavanja vodene pare $r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$

Temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora:

$$h_{(1+x)zr2} = h_{(1+x)zr1} - \frac{\Phi_{kond}}{q_{m,sz}} = 177,05 + \frac{16,19}{21,58} = 177,80 \text{ kJ/kg} \quad (136)$$

$$x_{zr2} = x_{zr1} = 0,046102 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz} \quad (137)$$

$$\vartheta_{zr2} = \frac{h_{(1+x)zr2} - r_0 \cdot x_{zr2}}{c_{p,z} + x_{zr2} \cdot c_{p,d}} = \frac{177,80 - 2500 \cdot 0,046102}{1,005 + 0,046102 \cdot 1,93} = 57,17 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (138)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,k} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{zr1}) - (\vartheta_k - \vartheta_{zr2})}{\ln \frac{\vartheta_k - \vartheta_{zr1}}{\vartheta_k - \vartheta_{zr2}}} = \frac{(69 - 56,49) - (69 - 57,17)}{\ln \frac{69 - 56,49}{69 - 57,17}} = 12,17 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (139)$$

Srednja temperatura zraka iznosi:

$$\vartheta_{m,k} = \vartheta_k - \Delta\vartheta_{m,k} = 69 - 12,17 = 56,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (140)$$

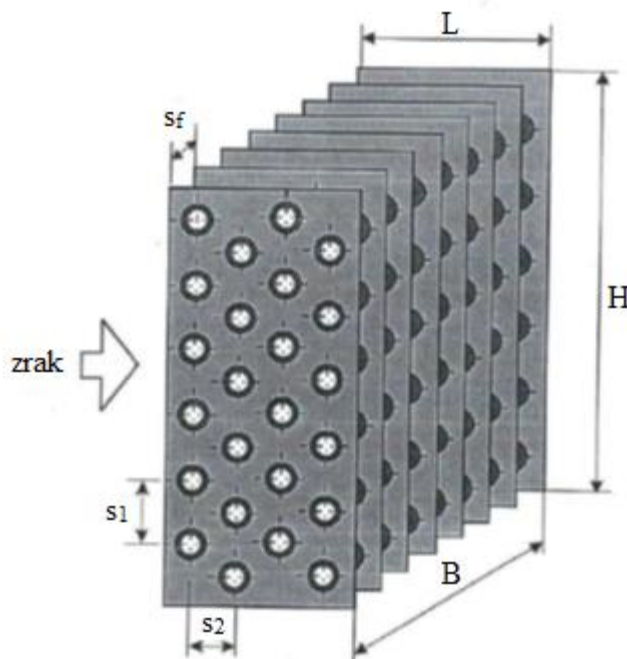
Fizikalna svojstva zraka za srednju temperaturu zraka od $\vartheta_{m,k} = 56,83 \text{ }^{\circ}\text{C}$ očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća zraka – $\rho_{zr} = 1,0698 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet zraka – $c_{p,zr} = 1,00783 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost zraka – $\lambda_{zr} = 0,02858 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost zraka – $\nu_{zr} = 1,87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Konstrukcijski parametri potrebni za proračun zrakom hlađenog kondenzatora iznose:

- Vanjski promjer cijevi – $d_e = 16 \text{ mm}$
- Unutarnji promjer cijevi – $d_i = 14 \text{ mm}$
- Debljina stijenke cijevi – $\delta = 1 \text{ mm}$
- Vertikalni razmak između cijevi – $s_1 = 36 \text{ mm}$
- Horizontalni razmak između cijevi – $s_2 = 20 \text{ mm}$
- Razmak između lamela – $s_f = 5,6 \text{ mm}$
- Debljina lamela – $f_i = 0,15 \text{ mm}$
- Broj redova – $i_r = 2$
- Broj cijevi u jednom redu – $i_t = 12$
- Broj ulaznih cijevi – $i_{in} = 6$
- Materijal cijevi – bakar
- Toplinska provodnost bakra – $\lambda_{CU} = 370 \text{ W/(m K)}$
- Materijal lamela – aluminij
- Toplinska provodnost aluminijske legure – $\lambda_{AL} = 209 \text{ W/(m K)}$

Prikaz konstrukcijskih parametara nalazi se na slici 24.



Slika 24. Konstrukcijski parametri kondenzatora[21]

Vanjska površina cijevi između lamela po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{mt} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = \pi \cdot 0,016 \cdot \left(1 - \frac{0,00015}{0,0056}\right) = 0,0489191 \text{ m}^2/\text{m} \quad (141)$$

Površina lamela po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_f = \frac{2 \cdot \left(s_1 \cdot s_2 - \pi \cdot \frac{d_e^2}{4}\right)}{s_f} = \frac{2 \cdot \left(0,036 \cdot 0,02 - \pi \cdot \frac{0,016^2}{4}\right)}{0,0056} = 0,185335 \text{ m}^2/\text{m} \quad (142)$$

Vanjska površina po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,0489191 + 0,185335 = 0,2342541 \text{ m}^2/\text{m} \quad (143)$$

Unutarnja površina po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i = \pi \cdot 0,014 = 0,0439823 \text{ m}^2/\text{m} \quad (144)$$

Omjer vanjske i unutarnje površine izmjenjivača iznosi:

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = \frac{0,2342541}{0,0439823} = 5,326 \quad (145)$$

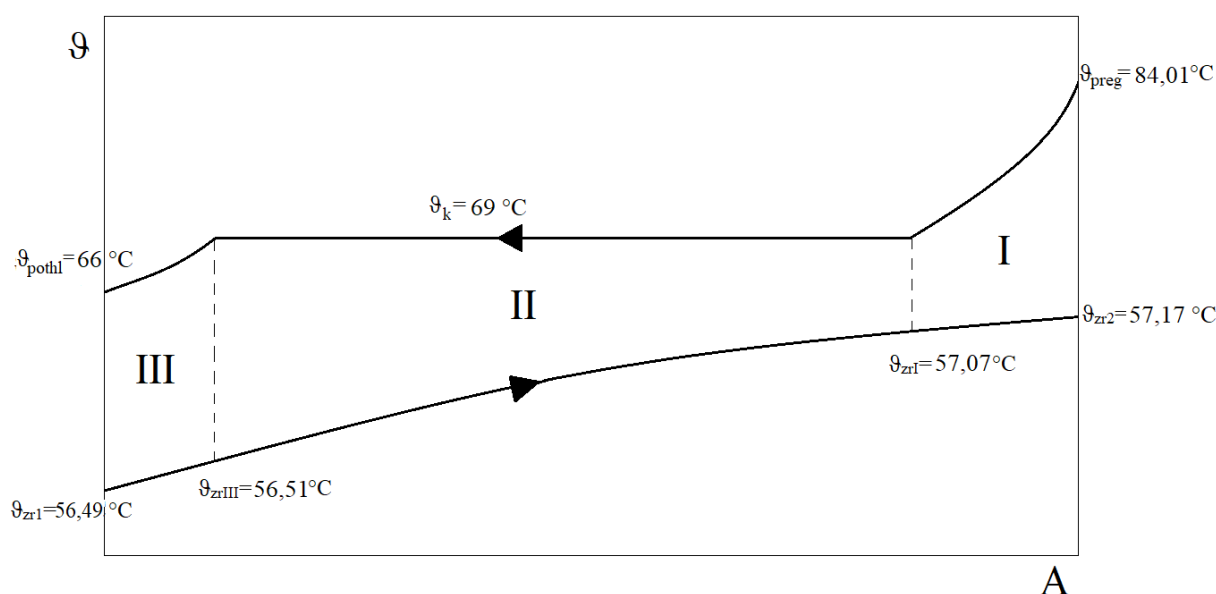
Visina izmjenjivača iznosi:

$$H = i_t \cdot s_1 = 12 \cdot 0,036 = 0,432 \text{ m} \quad (146)$$

Dubina izmjenjivača iznosi:

$$L = i_r \cdot s_2 = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ m} \quad (147)$$

Prolaskom kroz cijevi kondenzatora radna tvar se prvo hladi od temperature pregrijanja, zatim potpuno kondenzira te se pothlađuje. Pošto je koeficijent prolaza topline u ove tri zone različit, svaka zona se računa kao poseban izmjenjivač topline. Nakon određivanja površine pojedinačnih zona, one se zbrajaju kako bi se dobila ukupna površina izmjenjivača topline.



Slika 25. θ -A dijagram kondenzatora [21]

Specifični toplinski tok u zoni I iznosi:

$$q_I = h_2 - h_3 = 449,581 - 428,516 = 21,065 \text{ kJ/kg} \quad (148)$$

Specifični toplinski tok u zoni III iznosi:

$$q_{III} = h_4 - h_5 = 302,555 - 297,289 = 5,266 \text{ kJ/kg} \quad (149)$$

Specifični toplinski tok u zoni II (za $\vartheta_k = 69^\circ\text{C}$) iznosi:

$$r_1 = h_3 - h_4 = 428,516 - 302,555 = 125,961 \text{ kJ/kg} \quad (150)$$

Specifična toplina predana u kondenzatoru iznosi:

$$q_{\text{kond}} = q_I + h_1 + q_{III} = 21,065 + 125,961 + 5,266 = 152,292 \text{ kJ/kg} \quad (151)$$

Gustoća masenog toka radne tvari kroz cijevi iznosi:

$$G = \frac{q_{m,RT}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = \frac{0,10628}{6 \cdot \pi \cdot \frac{0,014^2}{4}} = 115,07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}) \quad (152)$$

Predani toplinski tok u zoni I iznosi:

$$\Phi_{preg} = q_{m,RT} \cdot q_I = 0,10628 \cdot 21,065 = 2,24 \text{ kW} \quad (153)$$

Predani toplinski tok u zoni II iznosi:

$$\Phi_{lat} = q_{m,RT} \cdot h_l = 0,10628 \cdot 125,961 = 13,39 \text{ kW} \quad (154)$$

Predani toplinski tok u zoni III iznosi:

$$\Phi_{pohl} = q_{m,RT} \cdot q_{III} = 0,10628 \cdot 5,266 = 0,56 \text{ kW} \quad (155)$$

Temperatura zraka na ulazu u zonu I iznosi:

$$\vartheta_{zrI} = \vartheta_{zr2} - \frac{\Phi_{preg}}{q_{m,zr} \cdot c_{p,zr}} = 57,17 - \frac{2,24}{22,57 \cdot 1,00783} = 57,07 \text{ °C} \quad (156)$$

Temperatura zraka na izlazu iz zone III iznosi:

$$\vartheta_{zrIII} = \vartheta_{zr1} + \frac{\Phi_{pohl}}{q_{m,zr} \cdot c_{p,zr}} = 56,49 + \frac{0,56}{22,57 \cdot 1,00783} = 56,51 \text{ °C} \quad (157)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,I} = \frac{(\vartheta_{preg} - \vartheta_{zr2}) - (\vartheta_k - \vartheta_{zrI})}{\ln \frac{(\vartheta_{preg} - \vartheta_{zr2})}{(\vartheta_k - \vartheta_{zrI})}} = \frac{(85,77 - 57,17) - (69 - 57,07)}{\ln \frac{(85,77 - 57,17)}{(69 - 57,07)}} = 18,387 \text{ °C} \quad (158)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,II} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{zrIII}) - (\vartheta_k - \vartheta_{zrI})}{\ln \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{zrIII})}{(\vartheta_k - \vartheta_{zrI})}} = \frac{(69 - 56,51) - (69 - 57,07)}{\ln \frac{(69 - 56,51)}{(69 - 57,07)}} = 12,205 \text{ °C} \quad (159)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni III iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,III} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{zrIII}) - (\vartheta_{pohl} - \vartheta_{zr1})}{\ln \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{zrIII})}{(\vartheta_{pohl} - \vartheta_{zr1})}} = \frac{(69 - 56,51) - (66 - 56,49)}{\ln \frac{(69 - 56,51)}{(66 - 56,49)}} = 10,930 \text{ °C} \quad (160)$$

Fizikalna svojstva radne tvari R134a (vrela kapljevina temperature 69 °C) očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća radne tvari – $\rho_{vk} = 1001,53 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet radne tvari – $c_{vk} = 1,82843 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost radne tvari – $\lambda_{vk} = 0,06147 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost radne tvari – $\nu_{vk} = 1,0587 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Fizikalna svojstva radne tvari R134a (suhozasićena para temperature 69 °C) očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća radne tvari – $\rho_{szp} = 112,34 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet radne tvari – $c_{szp} = 1,57766 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost radne tvari – $\lambda_{szp} = 0,02023 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost radne tvari – $\nu_{szp} = 1,279 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Fizikalna svojstva radne tvari R134a u zoni I (za srednju temperaturu $\vartheta_{RT,srI} = 76,505 \text{ °C}$) očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća radne tvari – $\rho_I = 103,26 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet radne tvari – $c_{p,I} = 1,38821 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost radne tvari – $\lambda_I = 0,01998 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost radne tvari – $\nu_I = 1,413 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Fizikalna svojstva radne tvari R134a u zoni III (za srednju temperaturu $\vartheta_{RT,srIII} = 67,5 \text{ °C}$) očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća radne tvari – $\rho_{III} = 1012,59 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet radne tvari – $c_{p,III} = 1,75460 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost radne tvari – $\lambda_{III} = 0,06291 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost radne tvari – $\nu_{III} = 1,097 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka i koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari ovise o dimenzijama izmjenjivača topline, koje trenutačno nisu poznate. Stoga se pretpostavljaju koeficijenti prolaza topline u pojedinim zonama kako bi se na temelju njih

dobile potrebne površine izmjene topline. Proračun se iterira dok se razlika između pretpostavljene i izračunate površine ne smanji na prihvatljivu vrijednost.

ZONA I:

Izračunati koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu iz prethodne iteracije proračuna:

$$k_{eI} = 19,55 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (161)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{e, trI} = k_{eI} \cdot \Delta\vartheta_{m,I} = 19,55 \cdot 18,387 = 359,47 \text{ W/m}^2 \quad (162)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{i, trI} = q_{e, trI} \cdot \beta = 359,47 \cdot 5,326 = 1914,54 \text{ W/m}^2 \quad (163)$$

Unutarnja površina prijelaza topline iznosi:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{preg}}{q_{i, trI}} = \frac{2,24 \cdot 1000}{1914,54} = 1,17 \text{ m}^2 \quad (164)$$

Ukupna duljina cijevi iznosi:

$$L_{ovI} = \frac{A_{iI}}{A_{i1}} = \frac{1,17}{0,0439823} = 26,602 \text{ m} \quad (165)$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu I iznosi:

$$L_{1I} = \frac{L_{ovI}}{i_r} = \frac{26,602}{2} = 13,301 \text{ m} \quad (166)$$

ZONA II:

Izračunati koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu iz prethodne iteracije proračuna:

$$k_{eII} = 24,40 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (167)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{e, trII} = k_{eII} \cdot \Delta\vartheta_{m,II} = 24,40 \cdot 12,205 = 297,802 \text{ W/m}^2 \quad (168)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{i, trII} = q_{e, trII} \cdot \beta = 297,802 \cdot 5,326 = 1586,09 \text{ W/m}^2 \quad (169)$$

Unutarnja površina prijelaza topline iznosi:

$$A_{iII} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{i, trII}} = \frac{13,39 \cdot 1000}{1586,09} = 8,442 \text{ m}^2 \quad (170)$$

Ukupna duljina cijevi iznosi:

$$L_{ovII} = \frac{A_{iII}}{A_{i1}} = \frac{8,442}{0,0439823} = 191,941 \text{ m} \quad (171)$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu II iznosi:

$$L_{1II} = \frac{L_{ovII}}{i_r} = \frac{191,941}{2} = 95,971 \text{ m} \quad (172)$$

ZONA III:

Izračunati koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu iz prethodne iteracije proračuna:

$$k_{eIII} = 19,38 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (173)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{e, trIII} = k_{eIII} \cdot \Delta\vartheta_{m, III} = 19,38 \cdot 10,930 = 211,82 \text{ W/m}^2 \quad (174)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{i, trIII} = q_{e, trIII} \cdot \beta = 211,82 \cdot 5,326 = 1128,15 \text{ W/m}^2 \quad (175)$$

Unutarnja površina prijelaza topline iznosi:

$$A_{iIII} = \frac{\Phi_{pothl}}{q_{i, trIII}} = \frac{0,56 \cdot 1000}{1128,15} = 0,4964 \text{ m}^2 \quad (176)$$

Ukupna duljina cijevi iznosi:

$$L_{ovIII} = \frac{A_{iIII}}{A_{i1}} = \frac{0,4964}{0,0439823} = 11,286 \text{ m} \quad (177)$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu III iznosi:

$$L_{1III} = \frac{L_{ovIII}}{i_r} = \frac{11,286}{2} = 5,643 \text{ m} \quad (178)$$

Potrebna širina kondenzatora iznosi:

$$B = \frac{L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}}{i_t} = \frac{13,301 + 95,971 + 5,643}{12} = 9,576 \text{ m} \quad (179)$$

Najmanja površina za strujanje zraka iznosi:

$$\begin{aligned}
 A_z &= (L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}) \cdot (s_1 - d_e) \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) \\
 &= (13,301 + 95,971 + 5,643) \cdot (0,036 - 0,016) \cdot \left(1 - \frac{0,00015}{0,0056}\right) \\
 &= 2,237 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{180}$$

Brzina strujanja zraka u najmanjem presjeku iznosi:

$$w_{zr} = \frac{q_{v,zr}}{A_z} = \frac{21,115}{2,237} = 9,44 \text{ m/s} \tag{181}$$

4.6.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Nusseltov bezdimenzijski broj računa se prema sljedećem izrazu[21]:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{eqv}}\right)^m \tag{182}$$

Ekvivalentan promjer iznosi:

$$\begin{aligned}
 d_{eqv} &= \frac{2 \cdot (s_1 - d_e) \cdot (s_f - f_t)}{(s_1 - d_e + s_f - f_t)} \\
 &= \frac{2 \cdot (0,036 - 0,016) \cdot (0,0056 - 0,00015)}{(0,036 - 0,016 + 0,0056 - 0,00015)} = 0,008566 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{183}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re = \frac{w_{zr} \cdot d_{eqv}}{\nu_{zr}} = \frac{9,44 \cdot 0,008566}{1,87 \cdot 10^{-5}} = 4324 \tag{184}$$

Određivanje koeficijenata n i m potrebnih za računanje Nusseltovog bezdimenzijskog broja vrši se prema sljedećim izrazima:

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{L}{d_{eqv}} = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{0,04}{0,008566} = 0,48082 \tag{185}$$

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{Re}{1000} = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{4324}{1000} = 0,06592 \tag{186}$$

Koeficijent C_1 određuje se pomoću sljedećeg izraza[21]:

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} \tag{187}$$

Tablica 9. prikazuje ovisnosti koeficijenta C_{1A} o omjeru $\frac{L}{d_{eqv}}$.

Tablica 11. Ovisnost koeficijenta C_{1A} o omjeru $\frac{L}{d_{eqv}}$

$\frac{L}{d_{eqv}}$	5	10	20	30	40	50
C_{1A}	0,412	0,326	0,201	0,125	0,080	0,0475

$$\frac{L}{d_{eqv}} = \frac{0,04}{0,008317} \approx 5$$

Očitana vrijednost: $C_{1A} = 0,412$

Koeficijent C_{1B} određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{Re}{1000} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{4324}{1000} = 0,32224 \quad (188)$$

Koeficijent C_1 stoga iznosi:

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} = 0,412 \cdot 0,32224 = 0,13276 \quad (189)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{eqv}}\right)^m = 0,13276 \cdot 4324^{0,48082} \cdot \left(\frac{0,04}{0,008566}\right)^{0,06592} = 8,230 \quad (190)$$

Jednadžba vrijedi u sljedećim uvjetima:

$$Re(4324) = 500 \div 10000$$

$$d_e(16 \text{ mm}) = 9 \div 16 \text{ mm}$$

$$\frac{s_f}{d_e}(0,35) = 0,18 \div 0,35$$

$$\frac{s_1}{d_e}(2,25) = 2 \div 5$$

$$\frac{L}{d_{eqv}}(\approx 5) = 4 \div 50$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka iznosi:

$$\alpha_{zr} = Nu \cdot \frac{\lambda_{zr}}{d_{eqv}} \quad (191)$$

Za šahovski raspored cijevi koeficijent prijelaza topline je 10% veći te stoga iznosi:

$$\alpha_{\text{zr}} = 1,1 \cdot Nu \cdot \frac{\lambda_{\text{zr}}}{d_{\text{eqv}}} = 1,1 \cdot 8,230 \cdot \frac{0,02858}{0,008566} = 30,2 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (192)$$

Koeficijent prijelaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi računa se prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_{\text{zr,i}} = \frac{\alpha_{\text{zr}} \cdot (A_f \cdot C_K \cdot E + A_{\text{mt}})}{A_{\text{i1}}} \quad (193)$$

Proračun efikasnost lamela vrši se na sljedeći način:

$$E = \frac{\tanh(m_f \cdot h_f)}{m_f \cdot h_f} = \frac{\tanh(43,89 \cdot 0,011968)}{43,89 \cdot 0,011968} = 0,9172 \quad (194)$$

Pri čemu koeficijent m_f iznosi:

$$m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\text{zr}}}{f_t \cdot \lambda_{\text{AL}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 30,2}{0,00015 \cdot 209}} = 43,89 \text{ (1/m)} \quad (195)$$

Dok se koeficijent h_f računa na sljedeći način:

Za $\frac{s_1}{2} < s_2$ i šahovski raspored cijevi vrijedi:

$$\rho_f = 1,27 \cdot \frac{B_f}{d_e} \cdot \left(\frac{A_f}{B_f} - 0,3\right)^{0,5} = 1,27 \cdot \frac{0,02691}{0,016} \cdot \left(\frac{0,036}{0,02691} - 0,3\right)^{0,5} = 2,1760 \quad (196)$$

Koeficijenti A_f i B_f se računaju na sljedeći način:

$$A_f = s_1 = 0,036 \text{ m} \quad (197)$$

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = \sqrt{\left(\frac{0,036}{2}\right)^2 + 0,02^2} = 0,02691 \text{ m} \quad (198)$$

$$\begin{aligned} h_f &= 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(\rho_f)] \\ &= 0,5 \cdot 0,016 \cdot (2,1760 - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(2,1760)] \\ &= 0,011968 \text{ m} \end{aligned} \quad (199)$$

Koeficijent prijelaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi iznosi:

$$\begin{aligned}\alpha_{zr,i} &= \frac{\alpha_{zr} \cdot (A_f \cdot C_k \cdot E + A_{mt})}{A_{i1}} \\ &= \frac{30,2 \cdot (0,185335 \cdot 0,99 \cdot 0,9172 + 0,0489191)}{0,0439823} \\ &= 149,14 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}\end{aligned}\quad (200)$$

Koeficijent C_k predstavlja koeficijent otpora spoja između cijevi i lamela. U idealnom slučaju $C_k = 1$, a u ovom slučaju uzeta je vrijednost $C_k = 0,99$.

4.6.2.2. Zona II (kondenzacija u cijevi)

Reynoldsov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Re_{II} = \frac{w_{vk} \cdot d_i}{\nu_{vk}} = \frac{G \cdot d_i}{\eta_{vk}} = \frac{G \cdot d_i}{\rho_{vk} \cdot \nu_{vk}} = \frac{115,07 \cdot 0,014}{1001,53 \cdot 1,0587 \cdot 10^{-7}} = 15193 \quad (201)$$

Prandtlov bezdimenzijski broj iznosi:

$$\begin{aligned}Pr_{II} &= \frac{c_{p,vk} \cdot \eta_{vk}}{\lambda_{vk}} = \frac{c_{p,vk} \cdot \rho_{vk} \cdot \nu_{vk}}{\lambda_{vk}} \\ &= \frac{1828,43 \cdot 1001,53 \cdot 1,0587 \cdot 10^{-7}}{0,06147} = 3,154\end{aligned}\quad (202)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj iznosi:

$$\begin{aligned}Nu_{II} &= 0,026 \cdot Pr_{II}^{\frac{1}{3}} \cdot \left[Re_{II} \cdot \left(\frac{\rho_{vk}}{\rho_{szp}} \right)^{0,5} + Re_{II} \right]^{0,8} \\ &= 0,026 \cdot 3,154^{\frac{1}{3}} \cdot \left[15193 \cdot \left(\frac{1001,53}{112,34} \right)^{0,5} + 15193 \right]^{0,8} \\ &= 255,26\end{aligned}\quad (203)$$

Jednadžba vrijedi ako su sljedeći uvjeti ispunjeni:

$$Re_{II} = 15193 > 5000$$

$$Re_{II} \left(\frac{\rho_{vk}}{\rho_{szp}} \right)^{0,5} = 15193 \cdot \left(\frac{1001,53}{112,34} \right)^{0,5} = 45354 > 20000$$

Koeficijent prijelaza topline za zonu II na strani radne tvari iznosi:

$$\alpha_{R,II} = \frac{Nu_{II} \cdot \lambda_{vk}}{d_i} = \frac{255,26 \cdot 0,06147}{0,014} = 1120,77 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (204)$$

Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu iznosi:

$$k_{III} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr,i}} + R_0 \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{R,II}}} \quad (205)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{149,14} + 0,0003 \cdot \frac{1}{5,326} + 2,703 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,014}{0,015} + \frac{1}{1120,77}}$$

$$= 130,16 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Koeficijent onečišćenja na strani zraka iznosi:

$$R_0 = 0,0003 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari iznosi:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Toplinski otpor stijenke cijevi računa se na sljedeći način:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda_{CU}} = \frac{0,001}{370} = 2,703 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \text{ K)/W} \quad (206)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu iznosi:

$$q_{III} = k_{III} \cdot \Delta\vartheta_{mII} = 130,16 \cdot 12,205 = 1588,60 \text{ W/m}^2 \quad (207)$$

Potrebna unutrašnja površina za prijelaz topline za zonu II iznosi:

$$A_{III} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{III}} = \frac{13,39 \cdot 1000}{1588,60} = 8,4288 \text{ m}^2 \quad (208)$$

4.6.2.3. Zona I (pregrijana para radne tvari u cijevima)

Volumenski protok radne tvari iznosi:

$$q_{v,RT,I} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_I} = \frac{0,10628}{103,26} = 0,001029 \text{ m}^3/\text{s} \quad (209)$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima iznosi:

$$w_{preg} = \frac{q_{v,RT,I}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = \frac{0,001029}{6 \cdot \pi \cdot \frac{0,014^2}{4}} = 1,114 \text{ m/s} \quad (210)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Re_I = \frac{w_{preg} \cdot d_i}{\nu_I} = \frac{1,114 \cdot 0,014}{1,413 \cdot 10^{-7}} = 110375,09 \quad (211)$$

Za $Re > 10000$ vrijedi sljedeća jednačba:

$$\begin{aligned}
 B_I &= 0,023 \cdot \rho_I^{0,8} \cdot c_I^{0,4} \cdot \lambda_I^{0,6} \cdot \eta_I^{-0,4} \\
 &= 0,023 \cdot \rho_I^{0,8} \cdot c_I^{0,4} \cdot \lambda_I^{0,6} \cdot (\nu_I \cdot \rho_I)^{-0,4} \\
 &= 0,023 \cdot 103,26^{0,8} \cdot 1388,21^{0,4} \cdot 0,01998^{0,6} \\
 &\quad \cdot (1,413 \cdot 10^{-7} \cdot 103,26)^{-0,4} \\
 &= 139,50
 \end{aligned} \tag{212}$$

Koeficijent prijelaza topline za zonu I na strani radne tvari iznosi:

$$\alpha_{R,I} = \frac{B_I \cdot w_{\text{preg}}^{0,8}}{d_i^{0,2}} = \frac{139,50 \cdot 1,114^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 357,16 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \tag{213}$$

Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu iznosi:

$$\begin{aligned}
 k_{iI} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr,i}} + R_0 \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{R,I}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{149,14} + 0,0003 \cdot \frac{1}{5,326} + 2,703 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,014}{0,015} + \frac{1}{357,16}} \\
 &= 104,56 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}
 \end{aligned} \tag{214}$$

Koeficijent onečišćenja na strani zraka iznosi:

$$R_0 = 0,0003 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari iznosi:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Toplinski otpor stijenke cijevi računa se na sljedeći način:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda_{\text{CU}}} = \frac{0,001}{370} = 2,703 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \text{ K)/W} \tag{215}$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu iznosi:

$$q_{iI} = k_{iI} \cdot \Delta\vartheta_{mI} = 104,56 \cdot 18,387 = 1922,54 \text{ W/m}^2 \tag{216}$$

Potrebna unutrašnja površina za prijelaz topline za zonu I iznosi:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{\text{preg}}}{q_{iI}} = \frac{2,24 \cdot 1000}{1922,54} = 1,165 \text{ m}^2 \tag{217}$$

4.6.2.4. Zona III (kapljevina radne tvari u cijevima)

Volumenski protok radne tvari iznosi:

$$q_{v,RT,III} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{III}} = \frac{0,10628}{1012,59} = 0,0001050 \text{ m}^3/\text{s} \quad (218)$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima iznosi:

$$w_{\text{pohl}} = \frac{q_{v,RT,III}}{i_{\text{in}} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = \frac{0,0001050}{6 \cdot \pi \cdot \frac{0,014^2}{4}} = 0,1137 \quad (219)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Re_{III} = \frac{w_{\text{pohl}} \cdot d_i}{\nu_{III}} = \frac{0,1137 \cdot 0,014}{1,097 \cdot 10^{-7}} = 14510,50 \quad (220)$$

Za $Re > 10000$ vrijedi sljedeća jednačba:

$$\begin{aligned} B_{III} &= 0,023 \cdot \rho_{III}^{0,8} \cdot c_{III}^{0,4} \cdot \lambda_{III}^{0,6} \cdot \eta_{III}^{-0,4} \\ &= 0,023 \cdot \rho_{III}^{0,8} \cdot c_{III}^{0,4} \cdot \lambda_{III}^{0,6} \cdot (\nu_{III} \cdot \rho_{III})^{-0,4} \\ &= 0,023 \cdot 1012,59^{0,8} \cdot 1754,60^{0,4} \cdot 0,06291^{0,6} \\ &\quad \cdot (1,097 \cdot 10^{-7} \cdot 1012,59)^{-0,4} \\ &= 840,86 \end{aligned} \quad (221)$$

Koeficijent prijelaza topline za zonu III na strani radne tvari iznosi:

$$\alpha_{R,III} = \frac{B_{III} \cdot w_{\text{pohl}}^{0,8}}{d_i^{0,8}} = \frac{840,86 \cdot 0,1137^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 346,82 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad (222)$$

Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu iznosi:

$$\begin{aligned} k_{III} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr,i}} + R_0 \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{R,III}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{149,14} + 0,0003 \cdot \frac{1}{5,326} + 2,703 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,014}{0,015} + \frac{1}{346,82}} \\ &= 103,66 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \end{aligned} \quad (223)$$

Koeficijent onečišćenja na strani zraka iznosi:

$$R_0 = 0,0003 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari iznosi:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$$

Toplinski otpor stijenke cijevi računa se na sljedeći način:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda_{CU}} = \frac{0,001}{370} = 2,703 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \text{ K)/W} \quad (224)$$

Specifični toplinski tok iznosi:

$$q_{III} = k_{III} \cdot \Delta\vartheta_{mIII} = 103,66 \cdot 10,93 = 1133,00 \text{ W/m}^2 \quad (225)$$

Potrebna unutrašnja površina za prijelaz topline za zonu III iznosi:

$$A_{III} = \frac{\Phi_{pothl}}{q_{III}} = \frac{0,56 \cdot 1000}{1133,00} = 0,4943 \text{ m}^2 \quad (226)$$

Ukupna potrebna unutrašnja površina iznosi:

$$A_i = A_{II} + A_{III} + A_{III} = 1,165 + 8,4288 + 0,4943 = 10,0881 \text{ m}^2 \quad (227)$$

Nastrujna brzina zraka iznosi:

$$w_f = \frac{q_{v,zr}}{B \cdot H} = \frac{21,115}{9,576 \cdot 0,432} = 5,104 \text{ m/s} \quad (228)$$

Pad tlaka zraka iznosi:

$$\begin{aligned} \Delta p_{zr} &= 0,233 \cdot i_r \cdot \left(\frac{s_2}{s_f - f_t} \right)^{0,42} \cdot (w_{zr} \cdot \rho_{zr})^{1,8} \\ &= 0,233 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,02}{0,0056 - 0,00015} \right)^{0,42} \cdot (9,44 \cdot 1,0698)^{1,8} \\ &= 51,67 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (229)$$

Konačne dimenzije zrakom hlađenog kondenzatora iznose:

$$\begin{aligned} L &= 0,04 \text{ m} \\ B &= 9,576 \text{ m} \\ H &= 0,432 \text{ m} \end{aligned}$$

Tablica 12. Sažetak rezultata proračuna zrakom hlađenog kondenzatora (zadnja iteracija)

Pretpostavka	
Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu Zona I, k_{iI} , [W/(m ² K)]	19,55
Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu Zona II, k_{iII} , [W/(m ² K)]	24,40
Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu Zona III, k_{iIII} , [W/(m ² K)]	19,38
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona I, A_{iI} , [m ²]	1,17
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona II, A_{iII} , [m ²]	8,442
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona III, A_{iIII} , [m ²]	0,4964
Izračunato	
Koef. prijelaza topline na strani zraka α_{zr} , [W/(m ² K)]	30,2
Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari Zona I $\alpha_{R,I}$, [W/(m ² K)]	357,16
Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari Zona II $\alpha_{R,II}$, [W/(m ² K)]	1120,77
Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari Zona III $\alpha_{R,III}$, [W/(m ² K)]	342,32
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona I, A_{iI} , [m ²]	1,165
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona II, A_{iII} , [m ²]	8,4288
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona III, A_{iIII} , [m ²]	0,4943

4.6.3. Dimenzioniranje isparivača za hlađenje zraka

Proračun isparivača za hlađenje zraka proveden je prema Ciconkovu.[21] Proračun je iterativan te je u ovom poglavlju prikazan proračun sa zadnjom iteracijom.

Ulazni parametri potrebni za proračun isparivača za hlađenje zraka iznose:

- Učin isparivača – $\Phi_{isp} = 13,05 \text{ kW}$
- Ulazna temperatura zraka – $\vartheta_{zr1} = 56,74 \text{ °C}$
- Specifična entalpija vlažnog zraka na ulazu u isparivač – $h_{(1+x)zr1} = 177,66 \text{ kJ/kg}$
- Sadržaj vlage zraka na ulazu u isparivač – $x_{zr1} = 0,04623 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$
- Izlazna temperatura zraka – $\vartheta_{zr2} = 34,27 \text{ °C}$
- Specifična entalpija vlažnog zraka na ulazu u isparivač – $h_{(1+x)zr2} = 125,47 \text{ kJ/kg}$
- Sadržaj vlage zraka na ulazu u isparivač – $x_{zr2} = 0,03547 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$
- Radna tvar – R134a
- Temperatura isparivanja – $\vartheta_i = 30 \text{ °C}$
- Temperatura pregrijanja radne tvari (temperatura na izlazu iz isparivača) – $\vartheta_{preg} = 35 \text{ °C}$
- Maseni protok suhog zraka – $q_{m,sz} = 0,25 \text{ kg/s}$
- Protok radne tvari – $q_{m,RT} = 0,10628 \text{ kg/s}$
- Specifični toplinski kapacitet suhog zraka pri konstantnom tlaku – $c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$
- Specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku – $c_{p,d} = 1,93 \text{ kJ/kgK}$
- Specifična toplota isparavanja vodene pare – $r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$
- Atmosferski tlak – $p_{atm} = 101325 \text{ Pa}$

Specifični volumen vlažnog zraka na ulazu u isparivač iznosi:

$$\begin{aligned}
 v_{zr,1} &= 461,5 \cdot \frac{(\vartheta_{zr1} + 273,15)}{p_{atm}} \cdot (0,622 + x_{zr1}) \\
 &= 461,5 \cdot \frac{(56,74 + 273,15)}{101325} \cdot (0,622 + 0,04623) \\
 &= 1,004 \text{ m}^3/\text{kg}
 \end{aligned} \tag{230}$$

Volumenski protok zraka iznosi:

$$q_{v,zr} = q_{m,sz} \cdot v_{zr,1} = 0,250 \cdot 1,004 = 0,251 \text{ m}^3/\text{s} \tag{231}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,i} = \frac{(\vartheta_{zr1} - \vartheta_{preg}) - (\vartheta_{zr2} - \vartheta_i)}{\ln \frac{\vartheta_{zr1} - \vartheta_{preg}}{\vartheta_{zr2} - \vartheta_i}} = \frac{(56,47 - 35) - (34,27 - 30)}{\ln \frac{56,47 - 35}{34,27 - 30}} = 10,73 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (232)$$

Srednja temperatura zraka iznosi:

$$\vartheta_{m,i} = \vartheta_i + \Delta\vartheta_{m,i} = 30 + 10,73 = 40,73^{\circ}\text{C} \quad (233)$$

Fizikalna svojstva zraka za srednju temperaturu zraka od $\vartheta_{m,i} = 40,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$ očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća zraka – $\rho_{zr} = 1,1248 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet zraka – $c_{p,zr} = 1,00696 \text{ kJ/(kg K)}$
- Toplinska vodljivost zraka – $\lambda_{zr} = 0,02741 \text{ W/(m K)}$
- Kinematička viskoznost zraka – $\nu_{zr} = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Za potrebe proračuna potrebno je odrediti stanje zraka koji je u kontaktu sa površinom isparivača. Tijekom izmjene topline dolazi do izdvajanja vlage stoga se može zaključiti da je zrak koji je u kontaktu sa površinom isparivača zasićen. Stanje zraka u kontaktu sa površinom isparivača određuje se iterativno iz sljedeće jednadžbe:

$$x_{zr2} = x_{zr1} - (x_{zr1} - x_s) \cdot \frac{\vartheta_{zr1} - \vartheta_{zr2}}{\vartheta_{zr1} - \vartheta_s} \quad (234)$$

Iterativno dobiveno stanje zraka u kontaktu sa površinom izmjenjivača iznosi:

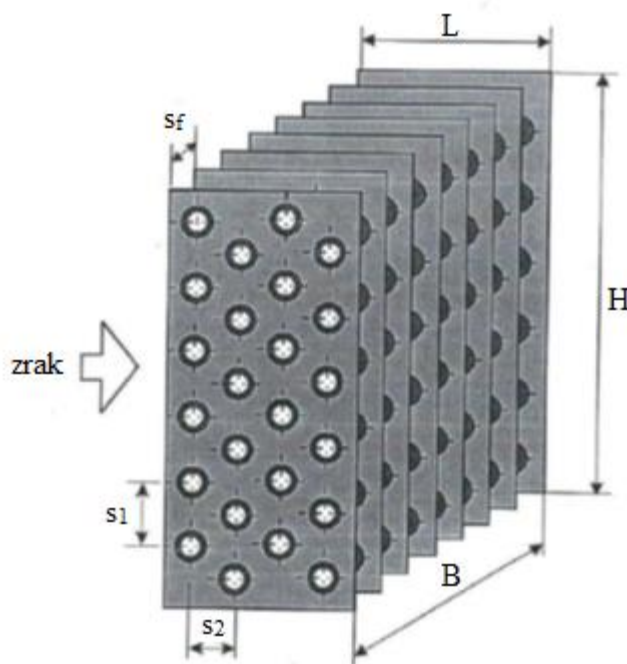
- Temperatura zraka u kontaktu sa površinom izmjenjivača – $\vartheta_s = 34,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sadržaj vlage zraka u kontaktu sa površinom isparivača – $x_s = 0,03547 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$

Konstruktivski parametri potrebni za proračun zrakom hlađenog kondenzatora iznose:

- Vanjski promjer cijevi – $d_e = 10 \text{ mm}$
- Unutarnji promjer cijevi – $d_i = 8 \text{ mm}$
- Debljina stijenke cijevi – $\delta = 1 \text{ mm}$
- Vertikalni razmak između cijevi – $s_1 = 20 \text{ mm}$
- Horizontalni razmak između cijevi – $s_2 = 30 \text{ mm}$
- Razmak između lamela – $s_f = 2,5 \text{ mm}$
- Debljina lamela – $f_i = 0,3 \text{ mm}$

- Broj redova – $i_r = 6$
- Broj cijevi u jednom redu – $i_t = 6$
- Broj ulaznih cijevi – $i_{in} = 6$
- Materijal cijevi – bakar
- Toplinska provodnost bakra – $\lambda_{CU} = 370 \text{ W/(m K)}$
- Materijal lamela – aluminij
- Toplinska provodnost aluminija – $\lambda_{AL} = 209 \text{ W/(m K)}$

Prikaz konstrukcijskih parametara nalazi se na slici 24.



Slika 26. Konstrukcijski parametri isparivača[21]

Vanjska površina cijevi između lamela po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{mt} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = \pi \cdot 0,01 \cdot \left(1 - \frac{0,0003}{0,0025}\right) = 0,027646015 \text{ m}^2/\text{m} \quad (235)$$

Površina lamela po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_f = \frac{2 \cdot \left(s_1 \cdot s_2 - \pi \cdot \frac{d_e^2}{4}\right)}{s_f} = \frac{2 \cdot \left(0,02 \cdot 0,03 - \pi \cdot \frac{0,01^2}{4}\right)}{0,0025} = 0,417168147 \text{ m}^2/\text{m} \quad (236)$$

Vanjska površina po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,027646015 + 0,417168147 = 0,444814162 \text{ m}^2/\text{m} \quad (237)$$

Unutarnja površina po jednom metru izmjenjivača iznosi:

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i = \pi \cdot 0,008 = 0,025132741 \text{ m}^2/\text{m} \quad (238)$$

Omjer vanjske i unutarnje površine izmjenjivača iznosi:

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = \frac{0,444814162}{0,025132741} = 17,699 \quad (239)$$

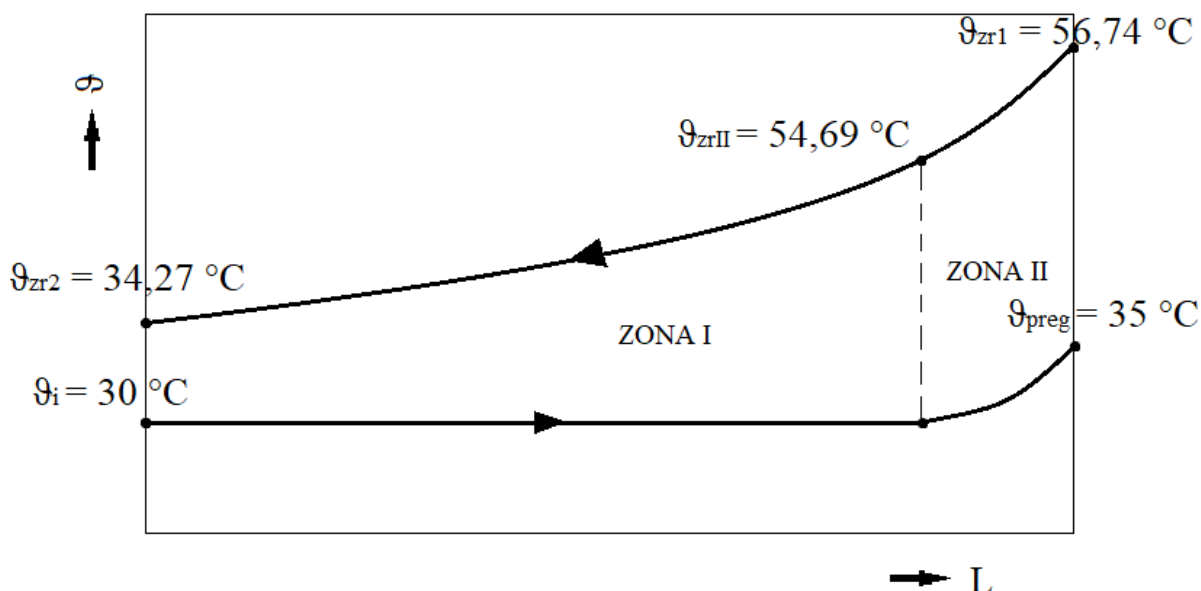
Visina izmjenjivača iznosi:

$$H = i_t \cdot s_1 = 6 \cdot 0,02 = 0,120 \text{ m} \quad (240)$$

Dubina izmjenjivača iznosi:

$$L = i_r \cdot s_2 = 6 \cdot 0,03 = 0,180 \text{ m} \quad (241)$$

Prolaskom kroz cijevi isparivača radna tvar prvo isparava, a zatim se pregrijava na temperaturu pregrijanja. Pošto je koeficijent prolaza topline u ove dvije zone različit, svaka zona se računa kao poseban izmjenjivač topline. Nakon određivanja površine pojedinačnih zona, one se zbrajaju kako bi se dobila ukupna površina izmjenjivača topline.



Slika 27. Θ - A dijagram isparivača

Specifični toplinski tok u zoni I (za $\vartheta_e = 24^\circ\text{C}$) iznosi:

$$r_1 = h_1 - h_6 = 414,819 - 297,289 = 117,530 \text{ kJ/kg} \quad (242)$$

Specifični toplinski tok u zoni II iznosi:

$$q_{II} = h_{1'} - h_1 = 420,080 - 414,819 = 5,261 \text{ kJ/kg} \quad (243)$$

Specifična toplina predana u isparivaču iznosi:

$$q_{isp} = q_{II} + h_1 = 5,261 + 117,530 = 122,791 \text{ kJ/kg} \quad (244)$$

Gustoća masenog toka radne tvari kroz cijevi iznosi:

$$G = \frac{q_{m,RT}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}} = \frac{0,10628}{6 \cdot \pi \cdot \frac{0,008^2}{4}} = 352,40 \text{ kg/(m}^2 \text{ s)} \quad (245)$$

Predani toplinski tok u zoni I iznosi:

$$\Phi_{lat} = q_{m,RT} \cdot h_1 = 0,10628 \cdot 117,530 = 12,49 \text{ kW} \quad (246)$$

Predani toplinski tok u zoni II iznosi:

$$\Phi_{preg} = q_{m,RT} \cdot q_{II} = 0,10628 \cdot 5,261 = 0,56 \text{ kW} \quad (247)$$

Temperatura zraka na ulazu u zonu II iznosi:

$$h_{(1+x)zrII} = h_{(1+x)zrI} - \frac{\Phi_{preg}}{q_{m,sz}} = 177,66 - \frac{0,56}{0,25} = 175,42 \text{ kJ/kg} \quad (248)$$

$$x_{zrII} = x_{zrI} = 0,04623 \quad (249)$$

$$\vartheta_{zrII} = \frac{h_{(1+x)zrII} - r_0 \cdot x_{zrII}}{c_{p,z} + x_{zrII} \cdot c_{p,d}} = \frac{175,42 - 2500 \cdot 0,04623}{1,005 + 0,04623 \cdot 1,93} = 54,69 \text{ }^\circ\text{C} \quad (250)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,I} = \frac{(\vartheta_{zrII} - \vartheta_i) - (\vartheta_{zrI} - \vartheta_i)}{\ln \frac{(\vartheta_{zrII} - \vartheta_i)}{(\vartheta_{zrI} - \vartheta_i)}} = \frac{(54,69 - 30) - (34,27 - 30)}{\ln \frac{(54,69 - 30)}{(34,27 - 30)}} = 11,637^\circ\text{C} \quad (251)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II iznosi:

$$\Delta\vartheta_{m,II} = \frac{(\vartheta_{zrI} - \vartheta_{preg}) - (\vartheta_{zrII} - \vartheta_i)}{\ln \frac{(\vartheta_{zrI} - \vartheta_{preg})}{(\vartheta_{zrII} - \vartheta_i)}} = \frac{(56,74 - 35) - (54,69 - 30)}{\ln \frac{(56,74 - 35)}{(54,69 - 30)}} = 23,184^\circ\text{C} \quad (252)$$

Fizikalna svojstva radne tvari R134a u zoni II (za srednju temperaturu $\vartheta_{RT,srII} = 32,5^\circ\text{C}$) očitana su pomoću programskog paketa CoolProp te iznose:

- Gustoća radne tvari – $\rho_{II} = 36,94 \text{ kg/m}^3$

- Specifični toplinski kapacitet radne tvari – $c_{p,II} = 1,05186 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- Toplinska vodljivost radne tvari – $\lambda_{II} = 0,01451 \text{ W}/(\text{m K})$
- Kinematička viskoznost radne tvari – $\nu_{II} = 3,253 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka i koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari ovise o dimenzijama izmjenjivača topline, koje trenutno nisu poznate. Stoga se pretpostavljaju koeficijenti prolaza topline u pojedinim zonama kako bi se na temelju njih dobile potrebne površine izmjene topline. Proračun se iterira dok se razlika između pretpostavljene i izračunate površine ne smanji na prihvatljivu vrijednost.

ZONA I:

Izračunati koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu iz prethodne iteracije proračuna:

$$k_{e,I} = 34,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (253)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{e,trI} = k_{eI} \cdot \Delta\vartheta_{m,I} = 34,69 \cdot 11,637 = 403,69 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (254)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{i,trI} = q_{e,trI} \cdot \beta = 403,69 \cdot 17,699 = 7144,91 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (255)$$

Unutarnja površina prijelaza topline iznosi:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{i,trI}} = \frac{12,49 \cdot 1000}{7144,91} = 1,7481 \text{ m}^2 \quad (256)$$

Ukupna duljina cijevi iznosi:

$$L_{ovI} = \frac{A_{iI}}{A_{i1}} = \frac{1,7481}{0,025132741} = 69,555 \text{ m} \quad (257)$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu I iznosi:

$$L_{1I} = \frac{L_{ovI}}{i_r} = \frac{69,555}{6} = 11,5925 \text{ m} \quad (258)$$

ZONA II:

Izračunati koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu iz prethodne iteracije proračuna:

$$k_{eII} = 23,64 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (259)$$

Specifični toplinski tok sveden na vanjsku površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{e,trII} = k_{eII} \cdot \Delta\vartheta_{m,II} = 23,64 \cdot 23,184 = 548,07 \text{ W/m}^2 \quad (260)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutarnju površinu kondenzatora iznosi:

$$q_{i,trII} = q_{e,trII} \cdot \beta = 548,07 \cdot 17,699 = 9700,29 \text{ W/m}^2 \quad (261)$$

Unutarnja površina prijelaza topline iznosi:

$$A_{iII} = \frac{\Phi_{preg}}{q_{i,trII}} = \frac{0,56 \cdot 1000}{9700,29} = 0,05773 \text{ m}^2 \quad (262)$$

Ukupna duljina cijevi iznosi:

$$L_{ovII} = \frac{A_{iII}}{A_{iI}} = \frac{0,05773}{0,025132741} = 2,297 \text{ m} \quad (263)$$

Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu II iznosi:

$$L_{1II} = \frac{L_{ovII}}{i_r} = \frac{2,297}{6} = 0,3828 \text{ m} \quad (264)$$

Potrebna širina kondenzatora iznosi:

$$B = \frac{L_{1I} + L_{1II}}{i_t} = \frac{11,5925 + 0,3828}{6} = 1,996 \text{ m} \quad (265)$$

Najmanja površina za strujanje zraka iznosi:

$$\begin{aligned} A_z &= (L_{1I} + L_{1II}) \cdot (s_1 - d_e) \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) \\ &= (11,5925 + 0,3828) \cdot (0,02 - 0,01) \cdot \left(1 - \frac{0,0003}{0,0025}\right) \\ &= 0,10539 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (266)$$

Brzina strujanja zraka u najmanjem presjeku iznosi:

$$w_{zr} = \frac{q_{v,zr}}{A_z} = \frac{0,251}{0,10539} = 2,38 \text{ m/s} \quad (267)$$

4.6.3.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Nusseltov bezdimenzijski broj računa se prema sljedećem izrazu[21]:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{\text{eqv}}} \right)^m \quad (268)$$

Ekvivalentan promjer iznosi:

$$d_{\text{eqv}} = \frac{2 \cdot (s_1 - d_e) \cdot (s_f - f_t)}{(s_1 - d_e + s_f - f_t)} = \frac{2 \cdot (0,02 - 0,01) \cdot (0,0025 - 0,0003)}{(0,02 - 0,01 + 0,0025 - 0,0003)} = 0,003607 \text{ m} \quad (269)$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re = \frac{w_{\text{zr}} \cdot d_{\text{eqv}}}{\nu_{\text{zr}}} = \frac{2,38 \cdot 0,003607}{1,71 \cdot 10^{-5}} = 502 \quad (270)$$

Određivanje koeficijenata n i m potrebnih za računanje Nusseltovog bezdimenzijskog broja vrši se prema sljedećim izrazima:

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{L}{d_{\text{eqv}}} = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{0,18}{0,003607} = 0,77936 \quad (271)$$

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{Re}{1000} = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{502}{1000} = -0,23984 \quad (272)$$

Koeficijent C_1 određuje se pomoću sljedećeg izraza[21]:

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} \quad (273)$$

Tablica 9. prikazuje ovisnosti koeficijenta C_{1A} o omjeru $\frac{L}{d_{\text{eqv}}}$.

Tablica 13. Ovisnost koeficijenta C_{1A} o omjeru $\frac{L}{d_{\text{eqv}}}$

$\frac{L}{d_{\text{eqv}}}$	5	10	20	30	40	50
C_{1A}	0,412	0,326	0,201	0,125	0,080	0,0475

$$\frac{L}{d_{\text{eqv}}} = \frac{0,12}{0,003930} = 49,91$$

Očitana vrijednost: $C_{1A} = 0,047795$

Koeficijent C_{1B} određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{Re}{1000} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{502}{1000} = 1,23952 \quad (274)$$

Koeficijent C_1 stoga iznosi:

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} = 0,047795 \cdot 1,23952 = 0,05949 \quad (275)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{eqv}} \right)^m = 0,05949 \cdot 502^{0,77936} \cdot \left(\frac{0,18}{0,003607} \right)^{-0,23984} = 2,965 \quad (276)$$

Jednadžba vrijedi u sljedećim uvjetima:

$$Re(502) = 500 \div 10000$$

$$d_e(10 \text{ mm}) = 9 \div 16 \text{ mm}$$

$$\frac{s_f}{d_e}(0,25) = 0,18 \div 0,35$$

$$\frac{s_1}{d_e}(2,00) = 2 \div 5$$

$$\frac{L}{d_{eqv}} (= 49,91) = 4 \div 50$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka iznosi:

$$\alpha_{zr} = Nu \cdot \frac{\lambda_{zr}}{d_{eqv}} \quad (277)$$

Za šahovski raspored cijevi koeficijent prijelaza topline je 10% veći te stoga iznosi:

$$\alpha_{zr} = 1,1 \cdot Nu \cdot \frac{\lambda_{zr}}{d_{eqv}} = 1,1 \cdot 2,965 \cdot \frac{0,02741}{0,003607} = 24,78 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (278)$$

Na površini isparivača dolazi do izdvajanja vlage sadržane u zraku, što znači da je vanjska površina isparivača mokra. U ovom slučaju prijenos topline je intenzivniji, što se izražava množenjem koeficijenta prijelaza topline na strani zraka α_{zr} sa faktorom ξ_w . Faktor ξ_w iznosi:

$$\xi_w = 1 + 2500 \cdot \frac{x_{zr1} - x_s}{\vartheta_{zr1} - \vartheta_s} = 1 + 2500 \cdot \frac{0,04623 - 0,03547}{56,74 - 34,27} = 2,197 \quad (279)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka kada se u obzir uzme i izdvajanje vlage iz zraka na površini isparivača iznosi:

$$\alpha_{zr,w} = \xi_w \cdot \alpha_{zr} = 2,197 \cdot 24,78 = 54,44 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (280)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka sveden na unutarnju površinu cijevi računa se prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_{zr,i} = \frac{\alpha_{zr,w} \cdot (A_f \cdot C_K \cdot E + A_{mt})}{A_{i1}} \quad (281)$$

Proračun efikasnost lamela vrši se na sljedeći način:

$$E = \frac{\tanh(m_f \cdot h_f)}{m_f \cdot h_f} = \frac{\tanh(41,67 \cdot 0,008511)}{41,67 \cdot 0,008511} = 0,9601 \quad (282)$$

Pri čemu koeficijent m_f iznosi:

$$m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{zr,w}}{f_t \cdot \lambda_{AL}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 54,44}{0,0003 \cdot 209}} = 41,67 \text{ (1/m)} \quad (283)$$

Dok se koeficijent h_f računa na sljedeći način:

Za $\frac{s_1}{2} < s_2$ i šahovski raspored cijevi vrijedi:

$$\begin{aligned} \rho_f &= 1,27 \cdot \frac{B_f}{d_e} \cdot \left(\frac{A_f}{B_f} - 0,3\right)^{0,5} = 1,27 \cdot \frac{0,03162}{0,01} \cdot \left(\frac{0,02}{0,03162} - 0,3\right)^{0,5} \\ &= 2,3156 \end{aligned} \quad (284)$$

Koeficijenti A_f i B_f se računaju na sljedeći način:

$$A_f = s_1 = 0,020 \quad (285)$$

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = \sqrt{\left(\frac{0,02}{2}\right)^2 + 0,03^2} = 0,03162 \text{ m} \quad (286)$$

$$\begin{aligned} h_f &= 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(\rho_f)] \\ &= 0,5 \cdot 0,01 \cdot (2,3156 - 1) \cdot [1 + 0,35 \cdot \ln(2,3156)] \\ &= 0,008511 \text{ m} \end{aligned} \quad (287)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka sveden na unutarnju površinu cijevi iznosi:

$$\alpha_{zr,i} = \frac{\alpha_{zr,w} \cdot (A_f \cdot C_K \cdot E + A_{mt})}{A_{i1}} = \frac{54,44 \cdot (0,417168147 \cdot 0,99 \cdot 0,9601 + 0,027646015)}{0,025132741} = 918,78 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (288)$$

Koeficijent C_K predstavlja koeficijent otpora spoja između cijevi i lamela. U idealnom slučaju $C_K = 1$, a u ovom slučaju uzeta je vrijednost $C_K = 0,99$.

4.6.3.2. Zona I (isparavanje u cijevi)

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari za zonu I procjenjuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\alpha_{R,I} = C \cdot \frac{G^{0,1} \cdot q_{il}^{0,7}}{d_i^{0,5}} \quad (289)$$

Ovisnost koeficijenta C od temperaturi isparavanja u slučaju korištenja radne tvari R134a prikazan je u tablici 11. [21]

Tablica 14. Ovisnost koeficijenta C o temperaturi isparavanja ϑ_i

Temperatura isparivanja, ϑ_i [°C]	-20		-10	0	10
Koeficijent C	0,1473		0,15515	0,1633	0,1720

Analizom podataka iz tablice 10. u programu Microsoft Office Excel dobivena je sljedeća funkcija koja opisuje ovisnost koeficijenta C o temperaturi isparavanja:

$$C = 0,0000000417 \cdot \vartheta_i^3 + 0,00000275 \cdot \vartheta_i^2 + 0,0008383333 \cdot \vartheta_i + 0,1633 \quad (290)$$

Za temperaturu isparavanja $\vartheta_i = 30$ °C koeficijent C iznosi:

$$\begin{aligned} C &= 0,0000000417 \cdot \vartheta_i^3 + 0,00000275 \cdot \vartheta_i^2 + 0,0008383333 \cdot \vartheta_i + 0,1633 \\ &= 0,0000000417 \cdot 30^3 + 0,00000275 \cdot 30^2 + 0,0008383333 \cdot 30 + 0,1633 \\ &= 0,1921 \end{aligned} \quad (291)$$

Procijenjeni koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari za zonu I iznosi:

$$\alpha_{R,I} = C \cdot \frac{G^{0,1} \cdot q_{il}^{0,7}}{d_i^{0,5}} = 0,1921 \cdot \frac{352,4^{0,1} \cdot 7144,91^{0,7}}{0,008^{0,5}} = 1925,23 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (292)$$

Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu iznosi:

$$\begin{aligned}
 k_{II} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr,i}} + R_0 \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{R,I}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{918,78} + 0,0003 \cdot \frac{1}{17,699} + 2,703 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,008}{0,009} + \frac{1}{1925,23}} \\
 &= 614,12 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}
 \end{aligned} \tag{293}$$

Koeficijent onečišćenja na strani zraka iznosi:

$$R_0 = 0,0003 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari iznosi:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Toplinski otpor stijenke cijevi računa se na sljedeći način:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda_{CU}} = \frac{0,001}{370} = 2,703 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \text{ K)/W} \tag{294}$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu iznosi:

$$q_{II} = k_{II} \cdot \Delta\vartheta_{mI} = 614,12 \cdot 11,637 = 7146,51 \text{ W/m}^2 \tag{295}$$

Potrebna unutarnja površina za prijelaz topline za zonu I iznosi:

$$A_{II} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{II}} = \frac{12,49 \cdot 1000}{7146,51} = 1,7477 \text{ m}^2 \tag{296}$$

4.6.3.3. Zona II (pregrijana para radne tvari u cijevima)

Volumenski protok radne tvari iznosi:

$$q_{v,RT,II} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_{II}} = \frac{0,10628}{36,94} = 0,002877 \text{ m}^3/\text{s} \tag{297}$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima iznosi:

$$w_{preg} = \frac{q_{v,RT,II}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = \frac{0,002877}{6 \cdot \pi \cdot \frac{0,008^2}{4}} = 9,54 \text{ m/s} \tag{298}$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj iznosi:

$$Re_{II} = \frac{w_{preg} \cdot d_i}{\nu_{II}} = \frac{9,54 \cdot 0,008}{3,253 \cdot 10^{-7}} = 234614 \tag{299}$$

Za $Re > 10000$ vrijedi sljedeća jednačba:

$$\begin{aligned} B_{II} &= 0,023 \cdot \rho_{II}^{0,8} \cdot c_{II}^{0,4} \cdot \lambda_I^{0,6} \cdot \eta_{II}^{-0,4} \\ &= 0,023 \cdot 36,94^{0,8} \cdot 1051,86^{0,4} \cdot 0,01451^{0,6} \cdot (3,253 \cdot 10^{-7} \cdot 36,94)^{-0,4} \\ &= 48,93 \end{aligned} \quad (300)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari za zonu II iznosi:

$$\alpha_{R,II} = \frac{B_{II} \cdot w_{preg}^{0,8}}{d_i^{0,2}} = \frac{48,93 \cdot 9,54^{0,8}}{0,008^{0,2}} = 780,90 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad (301)$$

Koeficijent prolaza topline u zoni II sveden na unutarnju površinu iznosi:

$$\begin{aligned} k_{III} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr,i}} + R_0 \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_{R,II}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{918,78} + 0,0003 \cdot \frac{1}{17,699} + 2,703 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,008}{0,009} + \frac{1}{780,90}} \\ &= 418,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \end{aligned} \quad (302)$$

Koeficijent onečišćenja na strani zraka iznosi:

$$R_0 = 0,0003 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Koeficijent onečišćenja na strani radne tvari iznosi:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$$

Toplinski otpor stijenke cijevi računa se na sljedeći način:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda_{CU}} = \frac{0,001}{370} = 2,703 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \text{ K)/W} \quad (303)$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu iznosi:

$$q_{III} = k_{III} \cdot \Delta\vartheta_{mII} = 418,7 \cdot 23,184 = 9707,14 \text{ W/m}^2 \quad (304)$$

Potrebna unutrašnja površina za prijelaz topline za zonu II iznosi:

$$A_{III} = \frac{\Phi_{preg}}{q_{III}} = \frac{0,56 \cdot 1000}{9707,14} = 0,05769 \text{ m}^2 \quad (305)$$

Ukupna potrebna unutrašnja površina iznosi:

$$A_i = A_{II} + A_{III} = 1,7477 + 0,05769 = 1,8054 \text{ m}^2 \quad (306)$$

Nastrujna brzina zraka iznosi:

$$w_f = \frac{q_{v,zr}}{B \cdot H} = \frac{0,251}{1,996 \cdot 0,120} = 1,048 \text{ m/s} \quad (307)$$

Pad tlaka zraka iznosi:

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{zr}} &= 0,233 \cdot i_r \cdot \left(\frac{s_2}{s_f - f_t} \right)^{0,42} \cdot (w_{\text{zr}} \cdot \rho_{\text{zr}})^{1,8} \\ &= 0,233 \cdot 6 \cdot \left(\frac{0,03}{0,0025 - 0,0003_t} \right)^{0,42} \cdot (2,38 \cdot 1,1248)^{1,8} \quad (308) \\ &= 24,65 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Konačne dimenzije isparivača za hlađenje zraka iznose:

$$L = 0,180 \text{ m}$$

$$B = 1,996 \text{ m}$$

$$H = 0,120 \text{ m}$$

Tablica 15. Sažetak rezultata proračuna isparivača za hlađenje zraka (zadnja iteracija)

Pretpostavka	
Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu Zona I, k_{IL} , [W/(m ² K)]	34,69
Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu Zona II, k_{II} , [W/(m ² K)]	23,64
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona I, A_{IL} , [m ²]	1,7481
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona II, A_{II} , [m ²]	0,05773
Izračunato	
Koef. prijelaza topline na strani zraka α_{zr} , [W/(m ² K)]	24,78
Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari Zona I α_{RI} , [W/(m ² K)]	1925,23
Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari Zona II α_{RII} , [W/(m ² K)]	780,90
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona I, A_{IL} , [m ²]	1,7477
Unutrašnja površina potrebna za prijenos topline Zona II, A_{II} , [m ²]	0,05769

5. TEHNIČKI OPIS KONTEJNERSKE KONDENZACIJSKE SUŠARE I OPIS VOĐENJA PROCESA

U tablici 16. prikazane su osnovne tehničke karakteristike kontejnerske kondenzacijske sušare piljenog drva bukve i hrasta.

Tablica 16. Osnovne tehničke karakteristike kontejnerske kondenzacijske sušare piljenog drva bukve i hrasta

Osnovne dimenzije kondenzacijske sušare	
Vanjske dimenzije kontejnera, d x š x v, [mm]	12192 x 2438 x 2870
Unutarnje dimenzije kontejnera, d x š x v, [mm]	12032 x 2350 x 2690
Unutarnje dimenzije komore za sušenje, d x š x v, [mm]	9700 x 2350 x 2690
Kapacitet punjenja (za piljenice debljine 25mm), [m ³]	11,34
Karakteristike sustava za obradu i strujanje zraka	
Radna tvar dizalice topline	R134a
Toplinska snaga isparivača dizalice topline, [kW]	13,05
Toplinska snaga kondenzatora dizalice topline, [kW]	16,19
Snaga kompresora dizalice topline, [kW]	3,14
Ekspanzijski element dizalice topline	Elektronički ekspanzijski ventil
Snaga pomoćnih električnih grijača zraka, [kW]	14,12
Broj ventilatora za strujanje zraka	13
Snaga pojedinačnog ventilatora, [W]	1150

Projektirana je kontejnerska kondenzacijska sušara za sušenje piljenog drva bukve i hrasta. Kontejner koji služi sa sušenje drva je brodski kontejner visoke izvedbe standardne veličine 40 stopa. Vanjska ovojnica sušare je obložena s 10 cm kamene vune kako bi se osigurala dobra izolacijska svojstva odnosno kako bi se smanjili transmisijski gubici topline kroz ovojnicu. Kako bi se smanjili ventilacijski gubici komore za sušenje potrebno je osigurati adekvatno brtvljenje svih spojeva.

Za termodinamičku obradu zraka u sušari koristi se dizalice topline zrak-zrak koja za radnu tvar koristi R134a. Kao izvor topline koristi se osjetna i latentna topline sadržana u struji zraka. Termodinamička obrada zraka opisana je u poglavlju 4.5. Isparivač i kondenzator dizalice topline su napravljeni od orebrenih bakrenih cijevi, materijal rebara je aluminij. Kako bi se osiguralo da sva radna tvar ispari u isparivaču, odnosno da ne dođe do hidrauličkog udara u kompresoru, koristi se elektronički ekspanzijski ventil. Regulator elektroničkog ekspanzijskog ventila pomoću temperaturnog osjetnika i pretvornika tlaka, koji su smješteni na usisnom vođu kruga radne tvari dizalice topline, određuje otvorenost elektroničkog ekspanzijskog ventila. Na taj način elektronički ekspanzijski ventil propušta onu količinu radne tvari koja će u potpunosti ispariti i pregrijati se na zadanu temperaturu. Za predgrijavanje i vršna opterećenja predviđeni su pomoćni električni grijači zraka. Kako bi se osigurao prijenos topline i vlage između zraka i piljenica koriste se visokoučinkoviti reverzibilni aksijalni ventilatori. Ventilatori moraju biti reverzibilni kako bi se mijenjanjem smjera strujanja zraka osiguralo ravnomjerno sušenje složaja piljenica. Kako bi korisnik sušare imao veću kontrolu nad procesom sušenja i kako bi se smanjila potrošnja energije predviđeni su aksijalni ventilatori s frekventno reguliranom brzinom vrtnje. Za slučajeve kada je relativna vlažnost u sušari preniska odnosno kada se želi smanjiti intenzitet sušenja kako bi se izbjeglo pogoršanje kvalitete proizvoda predviđene su mlaznice za ovlaživanje zraka. Punjenje komore za sušenje piljenicama može se vršiti pomoću viličara ili putem šina.

Predmetna kontejnerska sušara podijeljena je na dva dijela, komoru za sušenje i strojarnicu. Unutar komore za sušenje nalaze se isparivač i kondenzator dizalice topline, ventilatori, mlaznice za ovlaživanje zraka, električni predgrijači te mjerne sonde pomoću kojih se prati proces sušenja. Ventilatori, kondenzator, električni predgrijač i mlaznice za ovlaživanje zraka smješteni su u spušenom stropu komore za sušenje dok su sonde razmještene po prostoru komore za sušenje. Isparivač dizalice topline smješten je u posebnoj komori koja se nalazi na bočnoj stranici komore za sušenje. Zbog toga što se smjer strujanja zraka tijekom procesa sušenja mijenja potrebne su dvije komore za smještaj isparivača dizalice topline, po jedna na

svakoj bočnoj stranici komore za sušenje. U svakoj komori nalazi se po jedan isparivač te oni rade naizmjenično ovisno o smjeru strujanja zraka. Protok zraka unutar komore za smještaj isparivača regulira se pomoću zaklopke sa elektromotornim pogonom. U strojarnici se nalazi kompresor dizalice topline zajedno sa svom potrebnom armaturom kruga radne tvari dizalice topline. Osim navedene opreme u strojarnici se nalazi i centralno upravljačko računalo putem kojeg se može pratiti proces sušenja i upravljati procesom sušenja.

Regulacija procesa sušenja vrši se prema temperaturi, relativnoj vlažnosti i brzini strujanja zraka u sušari. Vrijednosti ovih parametara određuju se prema režimu sušenja u ovisnosti o trenutnom sadržaju vlage u piljenicama. Proces sušenja može se regulirati na sljedeće načine:

- Promjenom brzine vrtnje ventilatora
- Paljenjem i gašenjem dodatnog izvora topline
- Promjenom otvorenosti kanala prema komori u kojoj je smješten isparivač dizalice topline
- Promjenom brzine vrtnje kompresora dizalice topline
- Ubrizgavanjem kapljevite vode u struju zraka

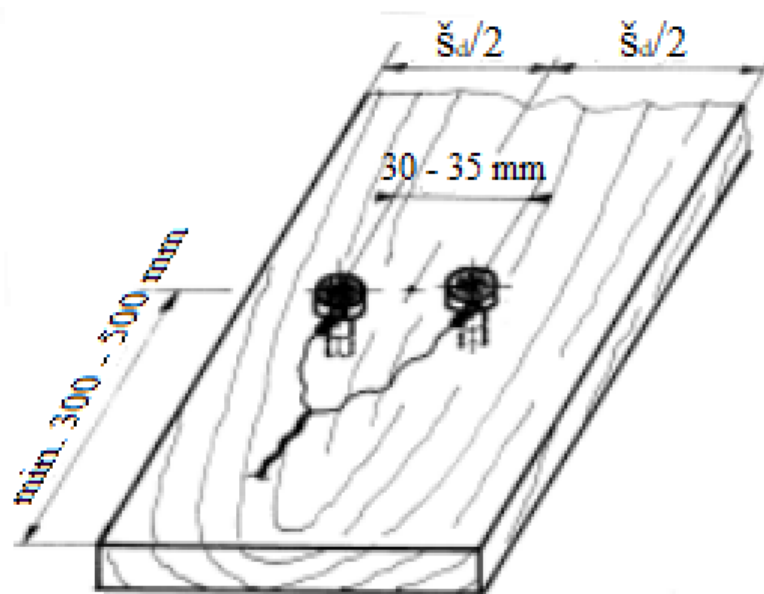
Kako bi se regulacija kvalitetno provodila potrebno je mjeriti sljedeće vrijednosti: temperaturu zraka u sušari, relativnu vlažnost zraka u sušari, temperaturu piljenica, trenutni sadržaj vlage piljenica i brzinu strujanja zraka u komori za sušenje.

Za mjerenje temperature i relativne vlažnosti zraka koriste se kombinirani osjetnici proizvod kao Vaisala, tip HMP60. Navedeni kombinirani osjetnik temperature i relativne vlažnosti ima radno područje od -40°C do 60°C te od 0% do 100% relativne vlažnosti.[22] Unutar komore za sušenje mora se nalaziti više kombiniranih osjetnika temperature i relativne vlažnosti, kako bi znali ako zrak u nekom dijelu komore za sušenje ima manju ili veću temperaturu odnosno relativnu vlažnost od zraka u ostalim dijelovima komore. Neravnomjerna podjela temperature i relativne vlažnosti po duljini komore za sušenje može dovesti do nezadovoljavajuće kvalitete proizvoda na kraju procesa. Za mjerenje površinske temperature piljenica koristi se otpornički temperaturni osjetnik Pt100.

Za kontrolu brzine strujanja zraka unutar komore za sušenje koristi se anemometar proizvod kao Ahlborn, tip FVAD 15-HMK5. Radno područje anemometra iznosi od 0,15 do 5 m/s, pri temperaturama od -20 do $+125^{\circ}\text{C}$.[23]

Mjerenje sadržaja vlage vrši se pomoću ubodnih elektroda koje mjere električna svojstva drvene tvari i električnu vodljivost vode. U sušaru se u paru postavlja više sklopova ubodnih elektroda na karakteristična mjesta u složajevima drva. Pomoću ubodnih mjernih sondi dobivamo

kontinuirano mjerenje srednje vrijednosti vlage drveta. Mjerenje pomoću ubodnih elektroda pouzdano je do sadržaja vlage drva u iznosu od 5-7%, ispod navedenog iznosa otpor drva je prevelik te su mjerenja nepouzdana. Primjer postavljanja ubodnih elektroda prikazan na slici 28.[6]



Slika 28. Primjer postavljanja ubodnih elektroda [6]

6. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog diplomskog rada izveden je projekt kontejnerske kondenzacijske dizalice topline za sušenje piljenog drva bukve i hrasta. Prema pravilima struke dimenzioniran je složaj, kako bi se osiguralo pravilno i ravnomjerno strujanje zraka unutar komore za sušenje. Na temelju potrebne maksimalne brzine strujanja zraka i pada tlaka kroz složaj odabrani su reverzibilni aksijalni ventilatori. U spušenom stropu komore za sušenje predviđeno je 13 ventilatora pojedinačne snage 1150 W. U radnoj točki ventilatori dobavljaju 95017,5 m³/h zraka čime se postiže maksimalna brzina strujanja zraka kroz složaj od 2,5 m/s. Zbog manjka podataka u literaturi brzina sušenja procijenjena je prema najvećoj brzini sušenja prilikom koje ne dolazi do narušavanja kvalitete proizvoda. Na temelju procijenjene brzine sušenja određene su potrebne snage isparivača i kondenzatora u tri radne točke. U radnoj točki na kraju procesa, koja je ujedno i kritična radna točka, potrebna snaga isparivača iznosi 13,05 kW dok snaga kondenzatora iznosi 16,86 kW. Prema kritičnoj radnoj točki dimenzionirane su komponente i cjevovodi dizalice topline. Snaga isparivača dizalice topline iznosi 13,05 kW, snaga kondenzatora iznosi 16,19 kW, a snaga kompresora iznosi 3,14 kW. Iz ovoga se može zaključiti da se dizalica topline ne može koristiti kao samostalan izvor topline, već je za potrebe predgrijavanja komore za sušenje i pokrivanje vršnih opterećenja potrebno predvidjeti pomoćne grijače. Nadalje, na temelju izračunatih snaga isparivača i kondenzatora dizalice topline provedeno je njihovo konstrukcijsko i termodinamičko dimenzioniranje kako bi se osiguralo da stanu u gabarite odabranog kontejnera. Predviđeno je da će proces sušenja biti potpuno automatiziran, za što je predviđena mogućnost regulacije svih parametara koji utječu na proces sušenja, kako bi se osiguralo kvalitetno i učinkovito upravljanje procesom te široko radno područje sustava.

LITERATURA

- [1] Tehnički procesi sušenja, https://www.fsb.unizg.hr/terma/online_materijali/Predavanje_1_Tehnicki_procesi_susenja.pdf, 28.4.2021.
- [2] Arun S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [3] Vasile Minea, Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2019.
- [4] Handbook, Wood. Wood Handbook-Wood as an engineering material. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. Gen. Tech. Rep. FPLGTR-113, 1999.
- [5] Glass, Samuel; Zelinka, Samuel. Moisture relations and physical properties of wood. Chapter 4 in FPL-GTR-282, 2021, 4-1-4-22.
- [6] Klimatizacija zraka, glavni čimbenik konvektivnog sušenja piljenog drva, <http://www.hkis.hr/Upload/Documents/EV/EV23/Predavanje%201.pdf>, 28.5.2021.
- [7] Lumber defects, <http://www.hobbitthouseinc.com/personal/woodpics/lumber%20defects.htm>, 28.5.2021.
- [8] Chua, K. J., et al. Heat pump drying: Recent developments and future trends. Drying technology, 2002, 20.8: 1579-1610.
- [9] Horvat, I.; Krpan, J.: Drvno industrijski priručnik, Zagreb, Tehnička knjiga, 1967.,
- [10] Pervan, S.: Priručnik za tehničko sušenje drva, Zagreb, Sand, 2000.,
- [11] Japarić, M.; Konvektivna sušara piljenog drva srednjeg kapaciteta, 2015., diplomski rad, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod
- [12] Krischer, O.Kroll, K.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer – Verlag, Berlin / Gottingen / Heidelberg, 1963.
- [13] Sustavi grijanja u zgradarstvu - metoda proračuna toplinskog opterećenja prema EN 12831, https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/22_02_2010_12505_EN_12831_Vjezbe.pdf, 12.6.2021
- [14] Galović, Antun. Termodinamika II. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [15] CoolProp, <http://www.coolprop.org/>, 1.7.2021.
- [16] Szmotku, M. B.; Campean, M.; Porojan, M. Strength reduction of spruce wood through slow freezing. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71.2: 205-210.
- [17] Wengert, Eugene M. Principles and practices of drying lumber. Lignomat USA Ltd, 2006.

-
- [18] CoolPack, <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>, 1.7.2021.
- [19] Halasz, B.; Galović, A; Boras, I.: Toplinske tablice, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.,
- [20] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [21] Ciconkov, Risto. Refrigeration: solved examples. Faculty of Mechanical Engineering, University "Sv. Kiril i Metodij", 2001.
- [22] HMP60 Humidity and Temperature Probe, <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/hmp60>, 2.7.2021
- [23] Digital vane anemometer for air, https://www.ahlborn.com/en_UK/p482,587,0,0/products/digital-vane-anemometer-for-air, 2.7.2021.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

