Odleđivanje isparivača industrijskih rashladnih komora za duboko smrznutu robu

Brnčić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:674281

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Brnčić

U Zagrebu, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Student:
Mislav Brnčić

U Zagrebu, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na pruženoj prilici i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Posebno bih se želio zahvaliti svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i svima koji su bili dio moga studija. Najveća hvala mojim roditeljima bez čije podrške i žrtve moj studij ne bi bio moguć. Ovaj rad posvećujem njima.

Mislav Brnčić

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 brodostrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 22 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 22 -**	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mislav Brnčić** JMBAG: 0035209021

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Odleđivanje isparivača industrijskih rashladnih komora za duboko smrznutu robu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Defrosting of evaporators of industrial refrigerating cold stores for deep-frozen goods**

Opis zadatka:

Čuvanje i skladištenje hrane u današnje izazovno vrijeme dodatno dobiva na važnosti. Prehrambeni proizvodi mogu se hladiti ili zamrzavati. Odluka hoće li će se roba samo hladiti ili potpuno zamrznuti ovisi o tipu robe i vremenu skladištenja. Roba koja se zamrzava, hladi se na temperaturu znatno nižu od točke zamrzavanja. Zbog sadržaja soli i šećera zamrzavanje se odvija i na temperaturama nižim od -18 °C. Neminovna je pojava u rashladnim komorama zaleđivanje isparivača rashladnog sustava koje je potrebno odleđivati.

Za potrebe industrijskog rashladnog sustava s 5.000 paletnih mjesta i 3.500 tona dubokosmrznutog mesa potrebno je analizirati sustav odleđivanja isparivača vrućim parama radne tvari. Promatrano rashladno postrojenje za hlađenje mesa na temperaturu od -20 °C je dvostupanjske izvedbe s amonijakom kao radnom tvari. Kondenzatori su evaporativne izvedbe. Postrojenje se nalazi na području grada Vrbovca.

Rad treba sadržavati:

1. Postavku i proračun parametara postojećeg rashladnog sustava komora za dubokosmrznutu robu.
2. Analizu postojećeg sustava za odleđivanje isparivača vrućim parama.
3. Model odleđivanja karakterističnog segmenta isparivača.
4. Analizu utjecaja vremenskog intervala između dva procesa odleđivanja isparivača i utjecaja naslaga leda na učinkovitost procesa.
5. Shemu spajanja i automatske regulacije sustava odleđivanja isparivača.
6. Dispozicijski crtež analiziranog isparivača.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
29. rujna 2022.	1. prosinca 2022.	12. – 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao: V. Soldo
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Popis slika II
Popis tablica III
Popis oznaka IV
Sažetak VII
Summary VIII
1. Uvod 1
2. Opis rashladnog sustava 2
2.1. Posredni sustav hlađenja 3
2.2. Direktni sustav hlađenja 6
3. Analiza potrošnje energije 12
4. Utjecaj leda na rashladni proces 21
5. Odleđivanje vrućim parama radne tvari 27
5.1. Uklanjanje kapljevite radne tvari 29
5.2. Dovod pregrijanih para radne tvari u isparivač 30
5.3. Dekompresija 31
6. Model odleđivanja isparivača 32
6.1. Definiranje ulaznih parametara modela 34
6.2. Faze odleđivanja isparivača 37
6.2.1. Faza 1 – zagrijavanje 38
6.2.2. Faza 2 – odleđivanje cijevi 41
6.2.3. Faza 3 – odleđivanje cijevi i lamele 44
6.2.4. Faza 4 – odleđivanje lamele 47
6.2.5. Faza 5 – suho grijanje 49
7. Regulacija procesa odleđivanja isparivača 55
7.1. Učinkovitost isparivača 55
7.2. Regulacijski sustavi 57
8. Zaključak 61
Popis literature 62
Prilog 1 63
Prilog 2 70

Popis slika

Slika 1 Novi dio tvornice 2
Slika 2 Shema posrednog sustava hlađenja 3
Slika 3 Shema direktnog sustava hlađenja 6
Slika 4 Vijčani kompresor direktnog rashladnog sustava 7
Slika 5 Potrošnja električne energije za pojedine mjesece 12
Slika 6 Očitanje radnih parametara kompresora posrednog rashladnog sustava 13
Slika 7 Opterećenje sustava hlađenja tijekom godine 14
Slika 8 Analogni manometri različitih temperaturnih razina direktnog sustava hlađenja 15
Slika 9 Promjena temperature kondenzacije kroz godinu 16
Slika 10 Udio pojedinih temperaturi kondenzacije za period jedne godine 17
Slika 11 Godišnja potrošnja električne energije rashladnog sustava 20
Slika 12 Porozna struktura leda [1] 21
Slika 13 Gusta struktura leda [2] 22
Slika 14 Usporedba strukture leda pri različitim temperaturama isparavanja [1] 22
Slika 15 Ukupna akumulirana masa leda u isparivaču [13] 23
Slika 16 Brzina strujanja zraka na izlazu iz isparivača [13] 23
Slika 17 Rashladni učin isparivača u ovisnosti o vremenu rada [13] 24
Slika 18 Ulazna i izlazna temperatura zraka u ovisnosti o vremenu [13] 24
Slika 19 Relativna vlažnost zraka u komori u ovisnosti o vremenu [13] 25
Slika 20 Gustoća leda u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka [12] 25
Slika 21 Pad kapaciteta isparivača za različite relativne vlažnosti ulaznog zraka 26
Slika 22 Shema odleđivanja isparivača Komore I vrućim parama radne tvari 28
Slika 23 Shema sustava s odleđivanjem isparivača vrućim parama radne tvari [4] 29
Slika 24 Prikaz faza odleđivanja isparivača vrućim plinom 31
Slika 25 Izmjenjivač proizvođača Alfa laval 32
Slika 26 Karakterističan dio isparivača [6] 33
Slika 27 Dijelovi modela [6] 33
Slika 28 Kretanje temperatura tijekom faze zagrijavanja 40
Slika 29 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja cijevi 43
Slika 30 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja cijevi i lamele 46
Slika 31 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja lamele 48
Slika 32 Kretanje temperatura tijekom faze suhog grijanja 50
Slika 33 Kretanje temperatura tijekom cijelog procesa odleđivanja 51
Slika 34 Vrijeme odleđivanja elementa u ovisnosti o početnoj debljini leda 52
Slika 35 Ovisnost vremena odleđivanja o gustoći leda 53
Slika 36 Ovisnost vremena odleđivanja o temperaturi kondenzacije 53
Slika 37 Gubitak zbog pada kapaciteta isparivača [12] 55
Slika 38 Parazitsko toplinsko opterećenje tijekom odleđivanja isparivača [12] 57
Slika 39 Udio parazitskog toplinskog opterećenja u ukupnim toplinskim gubicima u ovisnosti o trajanju odleđivanja [12] 58
Slika 40 Ovisnost ukupne učinkovitosti o Broju odleđivanja [12] 59
Slika 41 Shema regulacije sustava odleđivanja isparivača [4] 60

Popis tablica

Tablica 1 Karakteristične točke posrednog rashladnog procesa 4
Tablica 2 Karakteristične točke direktnog rashladnog procesa..... 8

Popis oznaka

Oznaka	***Jedinica***	***Opis***
h	$\frac{kJ}{kg}$	entalpija
p	bar	tlak
T	$°C$	temperatura
s	$\frac{kJ}{kgK}$	entropija
ϕ	kW	Toplinski tok
q_m	$\frac{kg}{s}$	maseni protok
P_{kom}	kW	snaga kompresora
EER	$-$	faktor hlađenja
RH	%	relativna vlažnost
Gr	$-$	Grashofova značajka
g	$\frac{kg\ m}{s^2}$	gravitacijsko ubrzanje
d_v	mm	vanjski promjer cijevi
d_u	mm	unutarnji promjer cijevi
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematska viskoznost
a	$\frac{m^2}{s}$	toplinska provodnost
Pr	$-$	Prandtlova značajka
Ra	$-$	Rayleighova značajka
Nu	$-$	Nusseltova značajka
α	$\frac{W}{m^2K}$	koeficijent prijelaza topline
w	$\frac{m}{s}$	brzina
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	gustoća

Re	$-$	Reynoldsova značajka
λ	$\frac{W}{m\,K}$	toplinska vodljivost
A	m^2	površina
δ	mm	debljina
L	mm	duljina segmenta cijevi
c	$\frac{kJ}{kgK}$	toplinski kapacitet
m	kg	masa
a	mm	duljina segmenta lamele
b	mm	visina segmenta lamele
r	$\frac{kJ}{kg}$	latentna toplina taljenja
Q	kJ	toplina

Indeksi

ch	rashladnici kapljevine
kon	kondenzator
$is1$	isparivači komora za skladištenje dubokosmrznute robe
$is2$	isparivači tunela za duboko zamrzavanje
wb	vlažni termometar
db	suhi termometar
RT	radna tvar
w	voda
z_zrak	zrak između lamela
act	stvarno
$pump - out$	uklanjanje zaostale kapljevine

$decomp$	dekompresija
HG	dovod pregrijane pare
PHL	parazitsko toplinsko opterećenje

Sažetak

U sklopu rada analiziran je amonijačni rashladni sustav industrijskog pogona za preradu i skladištenje mesa. Rashladni sustav sastoji se od direktnog sustava hlađenja s dvostupanjskom kompresijom i indirektnog sustava hlađenja s propilen glikolom kao rashladnim medijem. Proveden je proračun navedenih sustava u projektnim radnim uvjetima, te analiza godišnje potrošnje energije za pogon kompresora. Kompresori oba sustava spojeni su na evaporativni kondenzator na kojemu se održava konstantna temperatura kondenzacije 35°C. Predložena je rekonstrukcija regulacije sustava uz implementaciju varijabilne temperature kondenzacije, čija bi vrijednost ovisila o vanjskim uvjetima. Simulacija rada sustava s varijabilnom temperaturom kondenzacije, te proračun ušteda energije proveden je u računalnom programu *Matlab,* korištenjem satne metode.

Zbog niskih temperatura zraka u komorama za skladištenje duboko smrznutog mesa dolazi do zaleđivanja isparivača. Pregled istraživanja o utjecaju leda na rashladni proces i opis odleđivanja isparivača pregrijanim parama dan je u sklopu rada. Dinamički model odleđivanja isparivača vrućim parama razvijen je u računalnom programu *Simulink.* Cilj rada je razvoj modela koji će dati optimalno vrijeme trajanja odleđivanja i učinkovitost odleđivanja u ovisnosti o različitim utjecajnim parametrima. Model odleđivanja opisan je za element isparivača duljine cijevi 12 mm, s pripadnim dijelom lamele površine 92 x 79 mm. Odleđivanje je unutar modela podijeljeno u pet faza: zagrijavanje, odleđivanje cijevi, odleđivanje cijevi i lamele, odleđivanje lamele i suho grijanje.

Rezultati simulacije pokazali su da vrijeme odleđivanja isparivača raste s porastom početne debljine i gustoće leda. Vrijeme odleđivanja i razmak između dva odleđivanja ovise o strukturi i gustoći leda, koje su funkcije relativne vlažnosti ulaznog zraka. Smanjenjem temperature kondenzacije povećava se vrijeme odleđivanja isparivača.

Opisana je regulacija odleđivanja temeljem temperature isparivača, te dan pregled toplinskih gubitaka i ukupne učinkovitosti isparivača.

Ključne riječi: odleđivanje isparivača, industrijski rashladni sustav s R717, dinamički model

Summary

As part of the work, the ammonia cooling system of the industrial plant for meat processing and storage was analyzed. The cooling system consists of a direct cooling system with two-stage compression and an indirect cooling system with propylene glycol as cooling medium. The calculation of design load conditions of the mentioned systems was carried out, as well as the analysis of the annual energy consumption of compressors. The compressors of both systems are connected to an evaporative condenser where a constant condensation temperature of 35°C is maintained. An improvement of system control was proposed with the implementation of variable condensation temperature, the value of which would depend on external air conditions. The simulation of system operating with variable condensation temperature, and the calculation of energy savings was carried out in the computer program *Matlab*, using the hourly method.

The evaporators freeze due to the low air temperatures in the deep-frozen meat storage chambers. An overview of the research on the influence of ice on the cooling process and a description of the defrosting of the evaporator with superheated vapors is given as part of the paper. A dynamic model of evaporator defrosting with hot vapor gases was developed in the computer program *Simulink*. The goal of the paper was to determine the optimum duration and efficiency of defrosting depending on various parameters. The defrosting model is described for an evaporator element with a pipe length of 12 mm, with a corresponding lamella area of 92 x 79 mm. Defrosting process is divided into five phases within the model: heating, pipe defrosting, pipe and lamella defrosting, lamella defrosting and dry heating.

The simulation results showed that the defrosting time increases with the increase in the initial thickness and density of the ice. The time of defrosting and the duration between two defrosting processes depends on the structure and density of the ice, which are functions of the relative humidity of the incoming air. Decreasing the condensation temperature increases the defrosting time.

The control of defrosting process acording to evaporator temperature is described, and an overview of heat losses and the overall efficiency of the evaporator is given in the paper.

Keywords: defrosting of evaporator, R717 industrial refrigeration system, dynamic model

1. Uvod

Rashladni sustavi koriste se u prehrambenoj industriji za hlađenje i skladištenje prehrambenih proizvoda i sirovina. Održavanje niske temperature u rashladnim komorama nužno je za očuvanje kvalitete i produljenje roka trajanja proizvoda. Roba predodređena za skladištenje na duži vremenski period zamrzava se u tunelima za duboko zamrzavanje. Zamrzavanje se odvija pri temperaturama nižim od -18°C kako bi se ubrzao proces i sačuvala struktura nakon odmrzavanja. Zbog niskih temperatura isparavanja dolazi do zaleđivanja isparivača rashladnog sustava. Potrebno je stoga odleđivati isparivače kako bi se osigurao ispravan rad sustava.

U sklopu rada provedena je analiza postojećeg rashladnog sustava pogona za obradu i skladištenje mesnih proizvoda. Prikazan je satni proračun potrošnje energije sustava s konstantnom i varijabilnom temperaturom kondenzacije u *Matlab-u*. Dinamički model odleđivanja isparivača komore za duboko smrznutu robu razvijen je u računalnom programu *Simulink*.

Cilj rada je odrediti glavne utjecajne parametre za optimalnu regulaciju odleđivanja isparivača vrućim parama radne tvari.

2. Opis rashladnog sustava

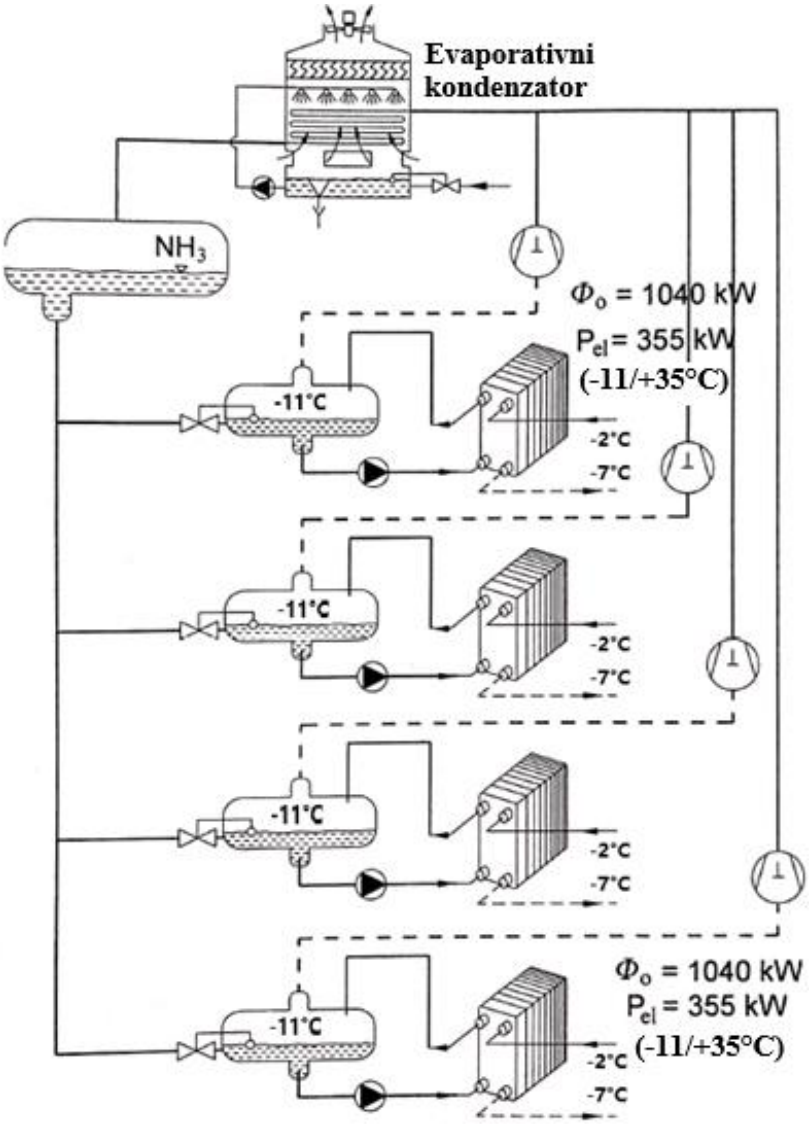
Industrijski pogon za preradu i skladištenje duboko smrznutog mesa vršnog kapaciteta prerade 3000 svinjskih polovica dnevno, s 5000 paletnih mjesta, smješteno je na području grada Vrbovca. Postrojenje se sastoji iz dva dijela, stare i nove tvornice izgrađene 2009. godine radi proširenja proizvodnih kapaciteta. Novi dio tvornice prikazan je na slici 1.

Slika 1 Novi dio tvornice

Hlađenje proizvodnog pogona izvedeno je pomoću sustava koji koristi R717, odnosno amonijak kao radnu tvar. Amonijačni sustavi standard su u primjeni u industrijskim postrojenjima zbog niza povoljnih termodinamičkih svojstava amonijaka. U industriji se koriste potopljeni amonijačni isparivači u kojima kapljevina djelomično isparava pri prolazu kroz isparivač te kompresor usisava radnu tvar u stanju suhozasićene pare. Padovi tlakova u cjevovodima znatno su manji što je posebno korisno u razgranatim sustavima s dugačkim cjevovodima poput navedenog. Osim toga amonijak je ekološki prihvatljiv budući da nema negativnog utjecaju na razaranje ozona i ne spada u stakleničke plinove. Ipak, uslijed propuštanja cjevovoda potrebno je na vrijeme detektirati lokaciju puštanja budući da je amonijak otrovan u smjesi sa zrakom već pri koncentracijama od 0,5 do 0,6%. Zbog toga su cjevovodi sustava s R717 najčešće opremljeni senzorima koji detektiraju amonijak u niskim koncentracijama što omogućava pravovremenu zaštitu ljudi i sanaciju puknuća na cjevovodu.

2.1. Posredni sustav hlađenja

Veći dio proizvodnog pogona sa slike 2 hlađen je indirektnim rashladnim sustavom sa smjesom propilen glikola i vode kao posrednim prijenosnikom energije. Posredni sustav hlađenja optimalno je rješenje u pogledu sigurnosnih razloga budući da se u većem djelu proizvodnog pogona nalaze radnici zaduženi za obradu, transport, pakiranje i kontrolu kvalitete proizvoda i sirovina. Svako propuštanje amonijaka zahtijevalo bi zatvaranje dijela pogona tijekom sanacije cjevovoda i predstavljalo potencijalnu opasnost za radnike u blizini mjesta propuštanja. Zbog toga je veći dio postrojenja hlađen posrednim sustavom iako navedeni sustavi imaju veću potrošnju energije u odnosu na direktni sustav. Shema posrednog sustava hlađenja prikazana je na slici 2.



Slika 2 Shema posrednog sustava hlađenja

Radna tvar R717 isparava u rashladnicima kapljevine pri -11°C i hladi smjesu propilen glikola i vode s -2°C na -7°C. Smjesa propilen glikola i vode se potom odvodi u izmjenjivače i predaje rashladnu energiju prostoru. Unutar rashladnika kapljevine dolazi do isparavanja amonijaka koji se pomoću vijčanih kompresora prebacuje na tlak kondenzacije i odvodi prema kondenzatoru. Kondenzator je evaporativnog tipa, što znači da se cijevi u kojima se odvija kondenzacija amonijaka prskaju vodom kako bi se pospješio prijenos topline na vanjski zrak. Nakon kondenzacije, amonijak se odvodi u „receiver“ kapljevine koji služi kao spremnik radne tvari. Radna tvar se potom iz receiver-a vodi prema ekspanzijskim ventilima koji spuštaju tlak na vrijednost tlaka isparavanja čime se zatvara krug radne tvari.

U nastavku je prikazan proračun parametara posrednog sustava hlađenja u projektnim radnim uvjetima. Kako prikazuje slika 2, temperatura isparavanja u rashladnicima kapljevine iznosi -11°C, a temperaturni režim glikola -2/-7°C. Temperatura kondenzacije održava se na 35°C neovisno o vrijednosti vanjske temperature, a pothlađenje na izlazu iz kondenzatora određeno je na 3°C. Nakon što su definirane temperature u karakterističnim točkama procesa proveden je proračun veličina stanja u navedenim točkama u programu *Excell* pomoću ekstenzije *Coolprop*. Veličine stanja prikazane su u tablici 1.

Tablica 1 Karakteristične točke posrednog rashladnog procesa

$R717$	$h\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	$p\ [bar]$	$T\ [°C]$	$s\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
$1'$	1594,72	2,79	-11	6,253
$2'$	1785,55	13,50	87,45	
$2_s{}'$	1824,32	13,50	102,45	6,253
$2_t{}'$	1922,72	13,50		
$3'$	496,98	13,50	32	
$4'$	496,98	2,79	-11	

Proračun entalpije pregrijanih para amonijaka na izlazu iz kompresora proveden je s pretpostavljenom vrijednosti izentropskog stupnja djelovanja kompresora $\eta_{iz} = 0{,}7$. Iz definicija izentropskog stupnja djelovanja slijedi:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s}' - h_1'}{h_{2t}' - h_1'} \rightarrow h_{2t}' = h_1' + \frac{h_{2s}' - h_1'}{\eta_{iz}} = 1922{,}72\,\frac{kJ}{kg} \tag{1}$$

Navedena vrijednost entalpije koristi se za proračun snage kompresora. Vijčani kompresori podmazivani su uljem koje osim podmazivanja služi i za hlađenje kompresora. Zbog toga se dio energije pregrijanih para predaje ulju koje se pritom zagrijava i smanjuje temperaturu radne tvari na izlazu iz kompresora. Temeljem mjerenja temperature ulja pretpostavljene su temperature radne tvari na izlazu iz kompresora navedene u tablici 1.

$$h_2' = h_2'(p_2', T_2') = 1785{,}55\,\frac{kJ}{kg} \tag{2}$$

Posredni rashladni sustav sastoji se od šest paralelno spojenih rashladnika kapljevine, svaki kapaciteta 1040 kW. Ukupni rashladni učin sustava iznosi stoga:

$$\phi_{ch,ukupno} = 6240\ kW \tag{3}$$

Protok radne tvari pri radu jednog rashladnika u punom kapacitetu dobiva se iz izraza:

$$q_{m,ch} = \frac{\phi_{ch}}{h_1' - h_4'} = 0{,}947\,\frac{kg}{s} \tag{4}$$

Snaga kompresora potrebna za komprimiranje navedenog protoka radne tvari iznosi:

$$P_{kom,ch} = q_{m,ch} * (h_{2t}' - h_1') = 310{,}73\ kW \tag{5}$$

Toplinski tok predan na kondenzatoru dobiva se iz izraza:

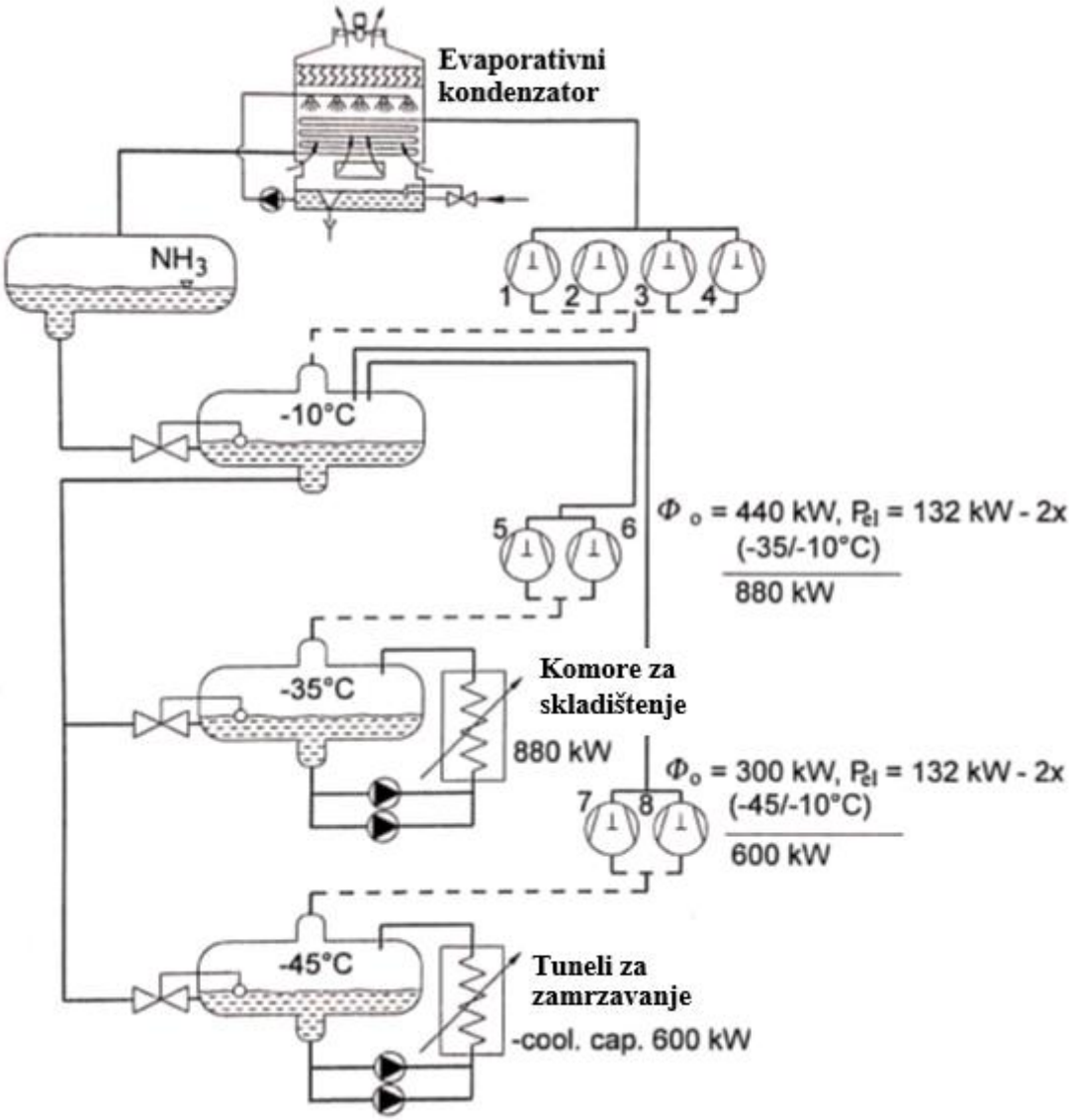
$$\phi_{kon} = q_{m,ch} * (h_2' - h_3') = 1350{,}65\ kW \tag{6}$$

Efikasnost rashladnika kapljevine dobiva se iz omjera isporučenog rashladnog učinka i privedene snage kompresoru pomoću izraza:

$$EER_{posredni} = \frac{\phi_{ch}}{P_{kom,ch}} = 3{,}35 \tag{7}$$

2.2. Direktni sustav hlađenja

Direktni sustav hlađenja koristi se u tunelima za duboko zamrzavanje mesa i u hladnjačama u kojima se to isto meso skladišti za kasniju uporabu. Zbog zahtjeva izrazito niske temperature zraka u navedenim prostorima nije moguće koristiti posredni rashladni sustav već se isparivači nalaze unutar kondicioniranog prostora. Slika 3 prikazuje shemu direktnog sustava hlađenja.



Slika 3 Shema direktnog sustava hlađenja

Unutar isparivača u tunelima za duboko zamrzavanje održava se temperatura isparavanja od -45°C kako bi se postigla temperatura zraka u tunelima od -35°C. Izrazito niska temperatura zraka omogućava brzo formiranje kristala leda iz vode prisutne u mesu, te na taj način osigurava visoku kvalitetu mesa i nakon odleđivanja. Tuneli za duboko zamrzavanje rade u šaržnom

načinu rada, što znači da se meso u njih doprema, vrata tunela se zatvaraju, meso se zadržava u tunelu i vremenskom periodu dok se zamrzavanje ne dovrši, te se potom otprema iz tunela, a postupak se ponavlja s novo pošiljkom mesa. Nakon zamrzavanja, duboko smrznuto meso se otprema na skladištenje u prostor hladnjača. Unutar dvije hladnjače za skladištenje mesa nalazi se deset isparivača u kojima R717 isparava na temperaturi od -35°C čime se zrak u prostoru hladnjače hladi na -25°C, što zadovoljava uvjete za dugotrajno skladištenje mesa.

Kako je vidljivo na slici 3, sustav direktnog hlađenja izveden je s dvostupanjskom kompresijom. Po dva kompresora za svaki temperaturni režim usisavaju suhozasićenu paru amonijaka nastalu u isparivačima te je komprimiraju na tlak u međuspremniku koji odgovara temperaturi isparavanja -10°C. Nakon toga se suhozasićena para na međutlaku usisava u visokotlačne kompresore i komprimira do tlaka kondenzacije. Razlog dvostupanjske kompresije su vrlo visoke temperature koje se postižu na izlazu iz kompresora zbog izrazito strmih izobara amonijaka u pregrijanome području. Bez primjene dvostupanjske kompresije temperature na kraju kompresije bi prelazile dopuštene granice te bi došlo do ubrzanog starenja ulja i problema u radu kompresora i sustava u cjelini. Osim stupnjevane kompresije, vrući plinovi amonijaka hlade se također dodavanjem ulja u kompresore, koji osim podmazivanja služe i za hlađenje kompresora.

Slika 4 Vijčani kompresor direktnog rashladnog sustava

Po izlasku iz kompresora pregrijane pare se vode u separator ulja u kojemu se odvaja ulje koje se potom hladi u hladnjaku ulja gdje se odvija djelomična rekuperacija topline. Ohlađeno ulje se potom vraća nazad u kompresor što rezultira smanjenjem temperature na izlazu iz kompresora. Vijčani kompresori direktnog rashladnog sustava su prikazani na slici 4.

Po izlasku iz visokotlačnih kompresora pregrijane pare amonijaka se vode u evaporativni kondenzator gdje se otpadna toplina kondenzacije predaje vanjskom zraku. Kondenzat amonijaka se odvodi u „receiver“ kapljevine nakon čega se prigušuje na međutlak koji odgovara temperaturi -10°C. Iz međuspremnika se kapljevina amonijaka dalje prigušuje na odgovarajući tlak i temperaturu ovisno vodi li se prema isparivačima u tunelima za duboko zamrzavanja ili hladnjačama za skladištenje smrznutog mesa.

U nastavku je prikazan proračun parametara direktnog sustava hlađenja u projektnim radnim uvjetima. Kako je prethodno opisano, temperature isparavanja u tunelima za duboko zamrzavanje i hladnjačama u projektnim uvjetima iznose -45°C i -35°C. Temperatura u međuspremniku iznosi -10°C, a temperatura kondenzacije održava se konstantno na 35°C. Nakon što su definirane temperature u karakterističnim točkama procesa proveden je proračun veličina stanja u navedenim točkama u programu *Excell* pomoću ekstenzije *Coolprop*. Veličine stanja prikazane su u tablici 2.

Tablica 2 Karakteristične točke direktnog rashladnog procesa

$R717$	$h\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	$p\ [bar]$	$T\ [°C]$	$s\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
1	1545,85	0,544	−45	6,824
2	1737,67	2,906	50	
2_s	1770,41	2,906	64,44	6,824
2_t	1866,65	2,906		
3	1561,53	0,93	−35	6,636
4	1691,97	2,906	30	
4_s	1709,51	2,906	37,64	6,636
4_t	1772,93	2,906		
5	1595,95	2,906	−10	6,239

6	1780,18	13,50	85,4	
6_s	1819,08	13,50	100,4	6,239
6_t	1914,71	13,50		
7	496,98	13,50	32	
8	299,74	2,906	−10	
9	299,74	0,93	−35	
10	299,74	0,544	−45	

Proračun entalpije pregrijanih para amonijaka na izlazu iz pojedinog kompresora proveden je s pretpostavljenom vrijednosti izentropskog stupnja djelovanja $\eta_{iz} = 0{,}7$ za svaki kompresor. Iz definicija izentropskog stupnja djelovanja slijede:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2t} - h_1} \rightarrow h_{2t} = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iz}} = 1866{,}65\,\frac{kJ}{kg} \tag{8}$$

$$\eta_{iz} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_{4t} - h_3} \rightarrow h_{4t} = h_3 + \frac{h_{4s} - h_3}{\eta_{iz}} = 1772{,}93\,\frac{kJ}{kg} \tag{9}$$

$$\eta_{iz} = \frac{h_{6s} - h_5}{h_{6t} - h_5} \rightarrow h_{6t} = h_5 + \frac{h_{6s} - h_5}{\eta_{iz}} = 1914{,}71\,\frac{kJ}{kg} \tag{10}$$

Navedene vrijednosti entalpije koriste se za proračun snage kompresora. Vijčani kompresori podmazivani su uljem koje osim podmazivanja služi i za hlađenje kompresora. Zbog toga se dio energije pregrijanih para predaje ulju koje se pritom zagrijava i smanjuje temperaturu radne tvari na izlazu iz kompresora. Temeljem mjerenja temperature ulja pretpostavljene su temperature radne tvari na izlazu iz kompresora navedene u tablici 2.

$$h_2 = h_2(p_2, T_2) = 1737{,}67\,\frac{kJ}{kg} \tag{11}$$

$$h_4 = h_4(p_4, T_4) = 1691{,}97\,\frac{kJ}{kg} \tag{12}$$

$$h_6 = h_6(p_6, T_6) = 1780{,}18\,\frac{kJ}{kg} \tag{13}$$

Ukupan kapacitet direktnog rashladnog sustava podijeljen je na dva dijela kako je navedeno ispod:

$$\phi_{is1} = 600\ kW \tag{14}$$

$$\phi_{is2} = 880\ kW \tag{15}$$

gdje $\phi_{is,1}$ označava kapacitet tunela za duboko zamrzavanje, a $\phi_{is,2}$ rashladni kapacitet hladnjače za skladištenje mesa.

Ukupni protok radne tvari kroz pojedini dio sustava dobiva se iz izraza:

$$q_{m1} = \frac{\phi_{is1}}{h_1 - h_{10}} = 0{,}481\frac{kg}{s} \tag{16}$$

$$q_{m2} = \frac{\phi_{is2}}{h_3 - h_9} = 0{,}697\frac{kg}{s} \tag{17}$$

dok se protok radne tvari kroz visokotlačni kompresor dobiva pomoću bilance međuspremnika iz koje slijedi izraz :

$$q_{m3} = q_{m1}\frac{h_2 - h_8}{h_5 - h_7} + q_{m2}\frac{h_4 - h_8}{h_5 - h_7} = 1{,}620\frac{kg}{s} \tag{18}$$

Snaga kompresora potrebna za komprimiranje navedenih protoka radne tvari iznosi:

$$P_{kom1} = q_{m1} * (h_{2t} - h_1) = 154{,}31\ kW \tag{19}$$

$$P_{kom2} = q_{m2} * (h_{4t} - h_3) = 147{,}35\ kW \tag{20}$$

$$P_{kom3} = q_{m3} * (h_{6t} - h_5) = 516{,}39\ kW \tag{21}$$

Ukupna snaga potrebna na pogon svih kompresora dobiva se stoga kao zbroj navedenih snaga kompresora:

$$P_{kom,uk} = P_{kom1} + P_{kom2} + P_{kom3} = 818{,}04\ kW \tag{22}$$

Ukupan toplinski tok predan na kondenzatoru dobiva se iz izraza:

$$\phi_{kon} = q_{m3} * (h_6 - h_7) = 2078{,}78\ kW \tag{23}$$

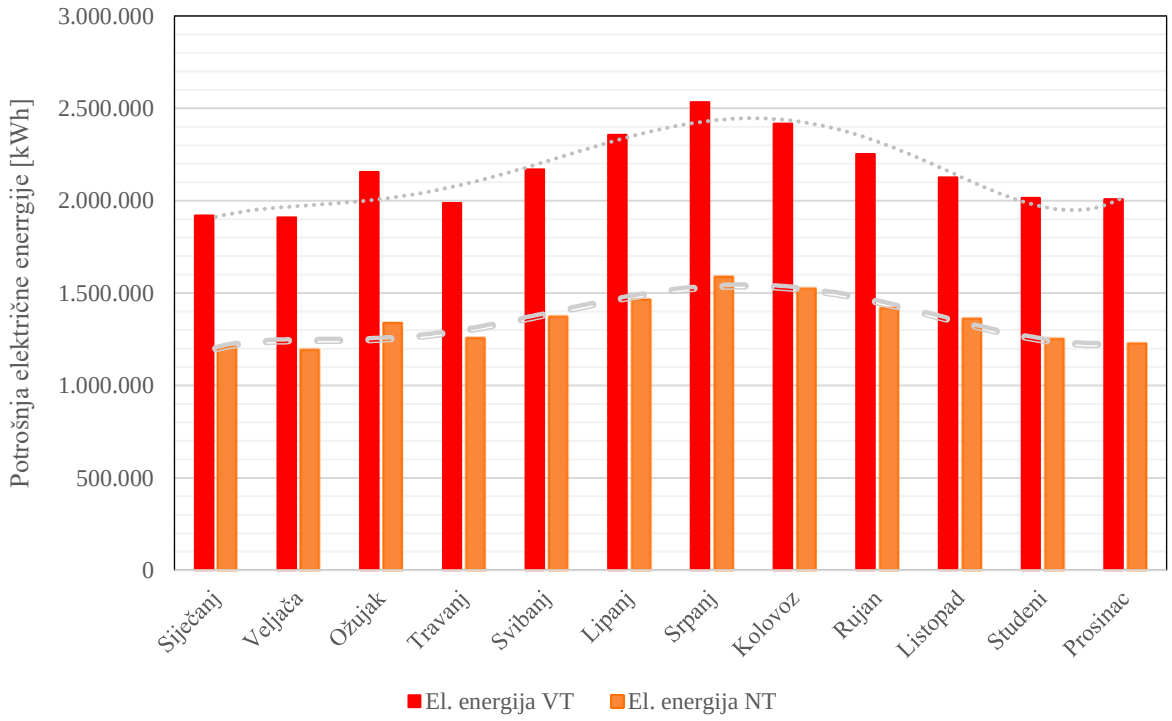
Efikasnost direktnog rashladnog kruga dobiva se iz omjera ukupnog isporučenog rashladnog učinka i privedene snage kompresorima pomoću izraza:

$$EER_{direktni} = \frac{\phi_{is1} + \phi_{is2}}{P_{kom,uk}} = 1{,}81 \tag{24}$$

Uočljivo je kako posredni sustav ima značajno višu efikasnost u odnosu na direktni rashladni sustav, što je i očekivano budući da direktni rashladni sustav radi na znatno nižim temperaturama isparavanja.

3. Analiza potrošnje energije

Rashladno postrojenje veliki je potrošač električne energije što je vidljivo iz ukupne snage potrebne za pogon kompresora u projektnim uvjetima, kako je prikazano u prethodnom poglavlju. Ipak, opterećenje na rashladni sustav varira tijekom godine ovisno o vrijednostima vanjske temperature. Uslijed nedostatka preciznijih podataka, opterećenje rashladnog sustava modelirano je prema podacima ukupne potrošnje električne energije cijele tvornice koje prikazuje slika 5.



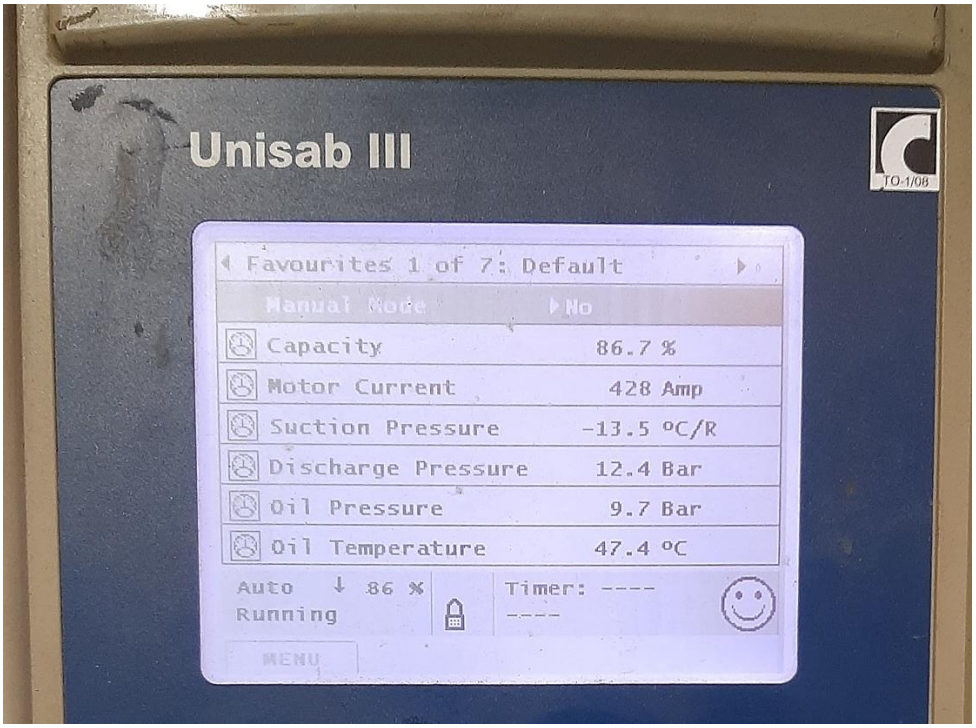
Slika 5 Potrošnja električne energije za pojedine mjesece

Slika 5 prikazuje promjenu potrošnje električne energije za 2021. godinu. Vidljivo je kako se potrošnja električne energije mijenja ovisno o mjesecu, najviša je u periodu ljeta, a najniža zimi. Može se također uočiti kako je potrošnja na niskoj tarifi značajno niža u odnosu na visoku tarifu. Djelomično se smanjenje potrošnje tijekom noći može objasniti smanjenjem proizvodnog kapaciteta, ali također i smanjenjem vanjske temperature što smanjuje potrebu hlađenja. Zbog prethodno navedenog, praktično je opisati toplinsko opterećenje sustava hlađenja kao funkciju vanjske temperature zraka.

Uz uvođenje određenih pretpostavki definirane su jednadžbe koje opisuju promjenu opterećenja na sustave hlađenja u ovisnosti o vrijednosti vanjske temperature zraka.

Pretpostavljeno je da najveći dio električne energije troši upravo strojarnica. Udio u ukupnoj potrošnji pretpostavljen je na 70%, konstantno tijekom cijele godine. Najveći nazivnu snagu, pa stoga i potrošnju električne energije u strojarnici imaju kompresori kao pogonski elementi rashladnog sustava. Udio kompresora u potrošnji električne energije strojarnice pretpostavljen je na 85%.

Osim udjela u ukupnoj potrošnji, potrebno je također definirati dio kapaciteta pojedinog sustava koji je uvijek u radu. Tvornica radi u tri smjene, te sustavi i u slučaju prekida rada proizvodnog pogona moraju održavati propisane temperature u skladišnim prostorima, budući da se radi o prehrambenim proizvodima. Na osnovu omjera potrošnje električne energije na visokom i niskom tarifnom modelu i iskustvenih podataka, pretpostavljeno je da je minimalno 50% kapaciteta posrednog sustava i 70% direktnog sustava hlađenja uvijek u radu. Slika 6 prikazuje očitanje opterećenja jednog od kompresora posrednog rashladnog sustava pri radu u djelomičnom opterećenju.



Slika 6 Očitanje radnih parametara kompresora posrednog rashladnog sustava

Temeljem prethodnih pretpostavki određene su sljedeće jednadžbe koje opisuju promjenu rashladnog opterećenja na direktni i posredni sustav hlađenja:

$$\phi_{ch} = \phi_{ch_max} * \left(0{,}50 + 0{,}50\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{25}$$

$$\phi_{is1} = \phi_{is1_max} * \left(0{,}70 + 0{,}30\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{26}$$

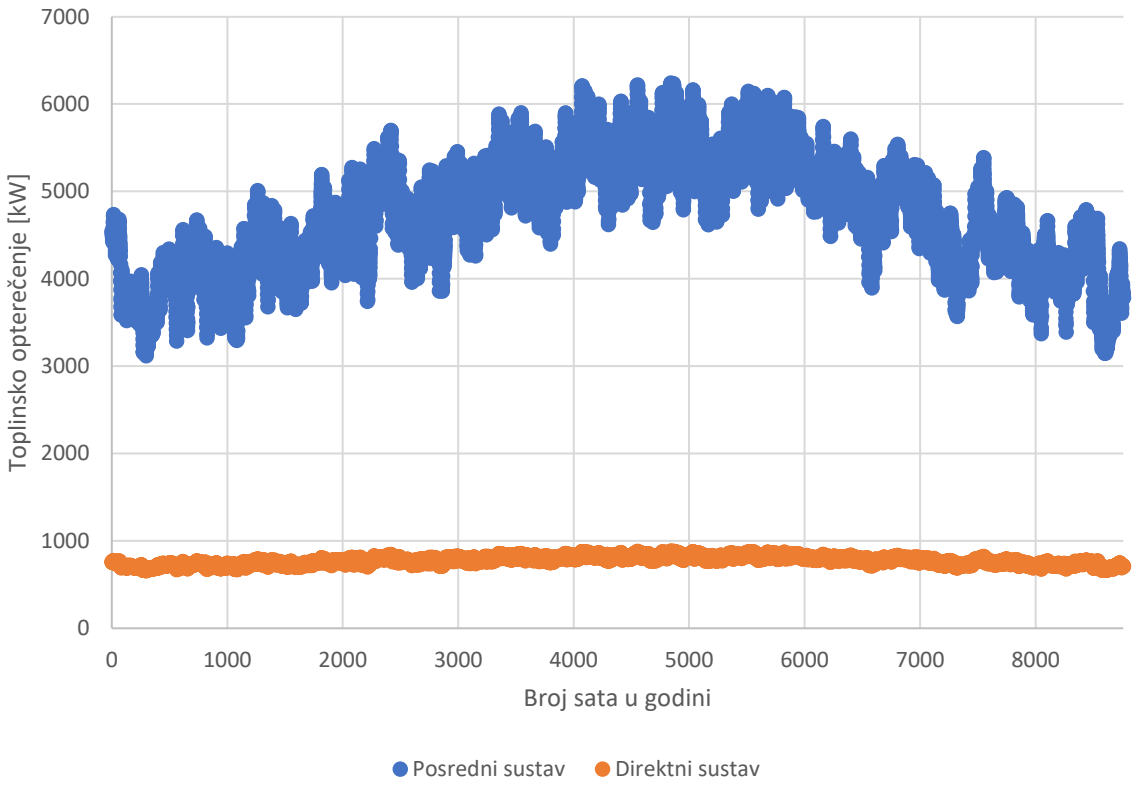
$$\phi_{is2} = \phi_{is2_max} * \left(0{,}70 + 0{,}30\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{27}$$

gdje su:

t_{db} – temperatura suhog termometra [°C]

31,2°C – najviša temperatura tijekom karakteristične godine prema podacima DHMZ

-9,85°C – najniža temperatura tijekom karakteristične godine prema podacima DHMZ



Slika 7 Opterećenje sustava hlađenja tijekom godine

Slika 7 prikazuje promjenu opterećenja sustava hlađenja tijekom godine. Opterećenje posrednog sustava hlađenja oscilira značajnije ovisno o vanjskoj temperaturi. Direktni sustav u odnosu na posredni ima relativno konstantan udio u ukupnoj potrošnji.

Postojeći rashladni sustav izveden je na način da su direktni i indirektni rashladni sustav spojeni na isti evaporativni kompresor. Oba rashladna kruga se stoga nalaze na istoj temperaturi kondenzacije. Obzirom na nisku temperaturu isparavanja u hladnjačama i tunelima za duboko zamrzavanje, dolazi do intenzivnog formiranja slojeva leda na stijenkama isparivača. Potrebno

je stoga često odleđivati isparivače kako ne bi došlo do značajnog pada kapaciteta uslijed nastanka naslaga leda.

Odleđivanje isparivača provodi se prekretanjem procesa gdje vruće pare amonijaka zagrijavaju isparivač i uklanjaju led sa stijenki. Tijekom odleđivanja isparivača potrebno je temperaturu kondenzacije držati na 35°C kako bi pregrijane pare bile dovoljno visoke temperature, a odleđivanje efikasno. Zbog velikog broja isparivača i česte potrebe za odleđivanjem, temperatura kondenzacije se tijekom čitave godine drži konstantno na 35°C.

Slika 8 Analogni manometri različitih temperaturnih razina direktnog sustava hlađenja

Zamjenom postojećeg seta prekretnih ventila i ugradnjom novoga seta ventila moguće je temperaturu kondenzacije spustiti ispod 35°C kada visoka temperatura kondenzacije nije potrebna, a zadržati efikasno odleđivanje isparivača. Spuštanje temperature kondenzacije povećava se efikasnost direktnog i posrednog sustava hlađenja i smanjuje potrošnja energije za pogon kompresora. Modelirana je klizna temperatura kondenzacije za 12°C viša od temperature vlažnog termometra.

U nastavku je prikazan proračun potrošnje energije sustava s konstantnom i kliznom temperaturom kondenzacije. Proračun potrošnje energije je identičan za oba slučaja, s razlikom da se u proračunu potrošnje energije s kliznom temperaturom kondenzacije mijenjaju vrijednosti entalpija na ulazu i izlazu iz kondenzatora u ovisnosti o temperaturi.

Temperatura vlažnog termometra određena je iz poznatih satnih podataka temperature i relativne vlažnosti prema Stull-ovoj formuli [5]:

$$t_{wb} = t_{db} \arctan\left(0{,}151977\sqrt{RH + 8{,}313659}\right) + \arctan(t_{db} + RH) - \arctan(RH - 1{,}676331) + 0{,}00391838RH^{3/2} * \arctan(0{,}023101RH) - 4{,}686035 \qquad (28)$$

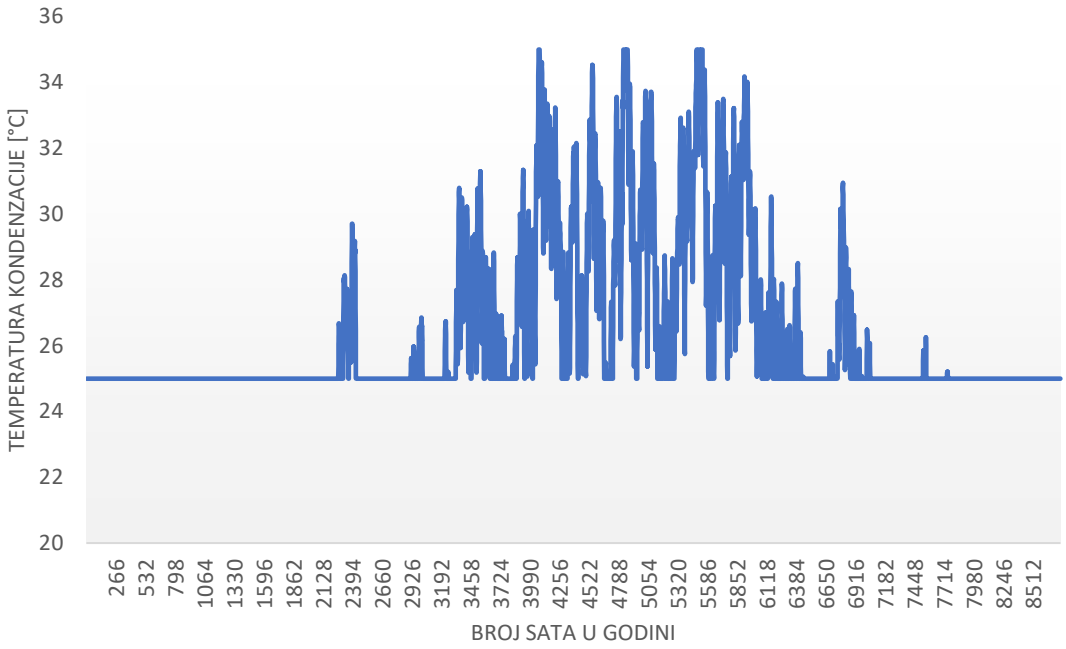
gdje su:

t_{wb} – temperatura vlažnog termometra [°C]

t_{db} – temperatura suhog termometra [°C]

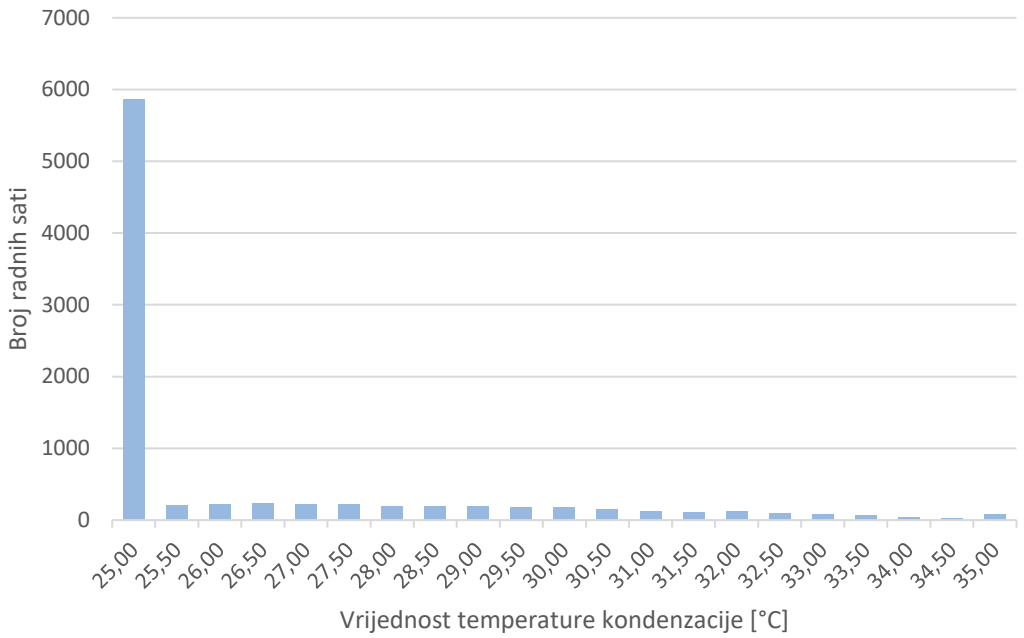
RH – relativna vlažnost [%]

Minimum temperature kondenzacije postavljen je na 25°C, a maksimum na 35°C. Slika 9 prikazuje promjenu temperature kondenzacije za period karakteristične godine.



Slika 9 Promjena temperature kondenzacije kroz godinu

Vidljivo je iz slike 9 kako temperatura kondenzacije kroz zimski period može pomoću regulacije biti spuštena na konstantnu vrijednost od 25°C. Iako iz slike 9 nije jasno vidljivo, dijagram na slici 10 jasno pokazuje udio pojedinih temperatura kondenzacije za period jedne godine.



Slika 10 Udio pojedinih temperaturi kondenzacije za period jedne godine

Za regulaciju temperature kondenzacije odabran je diskretni pomak od 0,5°C čime je pretpostavljena primjena preciznog sustava regulacije. Iz slike 10 je jasno kako je moguće temperaturu kondenzacije spustiti na donju definiranu granicu od 25°C tijekom velikog broja sati u godini i tek ju povremeno povisiti kada to vanjski uvjeti zahtijevaju.

Potrošnja energije direktnog i posrednog rashladnog sustava proračunata je za svaki sat u godini, za slučaj primjene konstantne temperature kondenzacije 35°C i klizne temperature kondenzacije. Proračun je proveden u računalnom programu *Matlab*, a kod proračuna se nalazi u prilogu.

Satni proračun potrošnje energije direktnog sustava je dan u nastavku.

Proračun entalpije pregrijanih para amonijaka na izlazu iz pojedinog kompresora prikazan je u nastavku. Iz definicija izentropskog stupnja djelovanja slijedi:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iz}} \tag{29}$$

$$\eta_{iz} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \rightarrow h_4 = h_3 + \frac{h_{4s} - h_3}{\eta_{iz}} \tag{30}$$

$$\eta_{iz} = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} \rightarrow h_6 = h_5 + \frac{h_{6s} - h_5}{\eta_{iz}} \tag{31}$$

Ukupan kapacitet direktnog rashladnog sustava podijeljen je na dva dijela kako je navedeno ispod:

$$\phi_{is1} = \phi_{is1_max} * \left(0{,}70 + 0{,}30\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{32}$$

$$\phi_{is2} = \phi_{is2_max} * \left(0{,}70 + 0{,}30\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{33}$$

gdje $\phi_{is,1_max}$ označava projektni kapacitet tunela za duboko zamrzavanje, a $\phi_{is,2_max}$ projektni kapacitet hladnjače za skladištenje mesa.

Ukupni protok radne tvari kroz pojedini dio sustava dobiva se iz izraza:

$$q_{m1} = \frac{\phi_{is1}}{h_1 - h_{10}} \tag{34}$$

$$q_{m2} = \frac{\phi_{is2}}{h_3 - h_9} \tag{35}$$

dok se protok radne tvari kroz visokotlačni kompresor dobiva pomoću bilance međuspremnika iz koje slijedi izraz :

$$q_{m3} = q_{m1}\frac{h_2 - h_8}{h_5 - h_7} + q_{m2}\frac{h_4 - h_8}{h_5 - h_7} \tag{36}$$

Snaga kompresora potrebna za komprimiranje navedenih protoka radne tvari iznosi:

$$P_{kom1} = q_{m1} * (h_2 - h_1) \tag{37}$$

$$P_{kom2} = q_{m2} * (h_4 - h_3) \tag{38}$$

$$P_{kom3} = q_{m3} * (h_6 - h_5) \tag{39}$$

Ukupna snaga potrebna na pogon svih kompresora dobiva se stoga kao zbroj navedenih snaga kompresora:

$$P_{kom,uk} = P_{kom1} + P_{kom2} + P_{kom3} \tag{40}$$

Ukupan toplinski tok predan na kondenzatoru dobiva se iz izraza:

$$\phi_{kon} = q_{m3} * (h_6 - h_7) \tag{41}$$

Satni proračun potrošnje energije posrednog sustava je prikazan u nastavku.

Proračun entalpije pregrijanih para amonijaka na izlazu iz kompresora prikazan je u nastavku. Iz definicija izentropskog stupnja djelovanja slijedi:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s}{}' - h_1{}'}{h_2{}' - h_1{}'} \rightarrow h_2' = h_1' + \frac{h_{2s}{}' - h_1{}'}{\eta_{iz}} \tag{42}$$

Opterećenje posrednog rashladnog sustava modelirano je prema formuli:

$$\phi_{ch} = \phi_{ch_max} * \left(0{,}50 + 0{,}50\frac{t_{db} + 9{,}85}{31{,}2 + 9{,}85}\right) \tag{43}$$

gdje je ϕ_{ch_max} projektno opterećenje posrednog rashladnog sustava.

Ukupni protok radne tvari pri radu svih rashladnika u punom kapacitetu dobiva se iz izraza:

$$q_{m,ch} = \frac{\phi_{ch,ukupno}}{h_1{}' - h_4{}'} \tag{44}$$

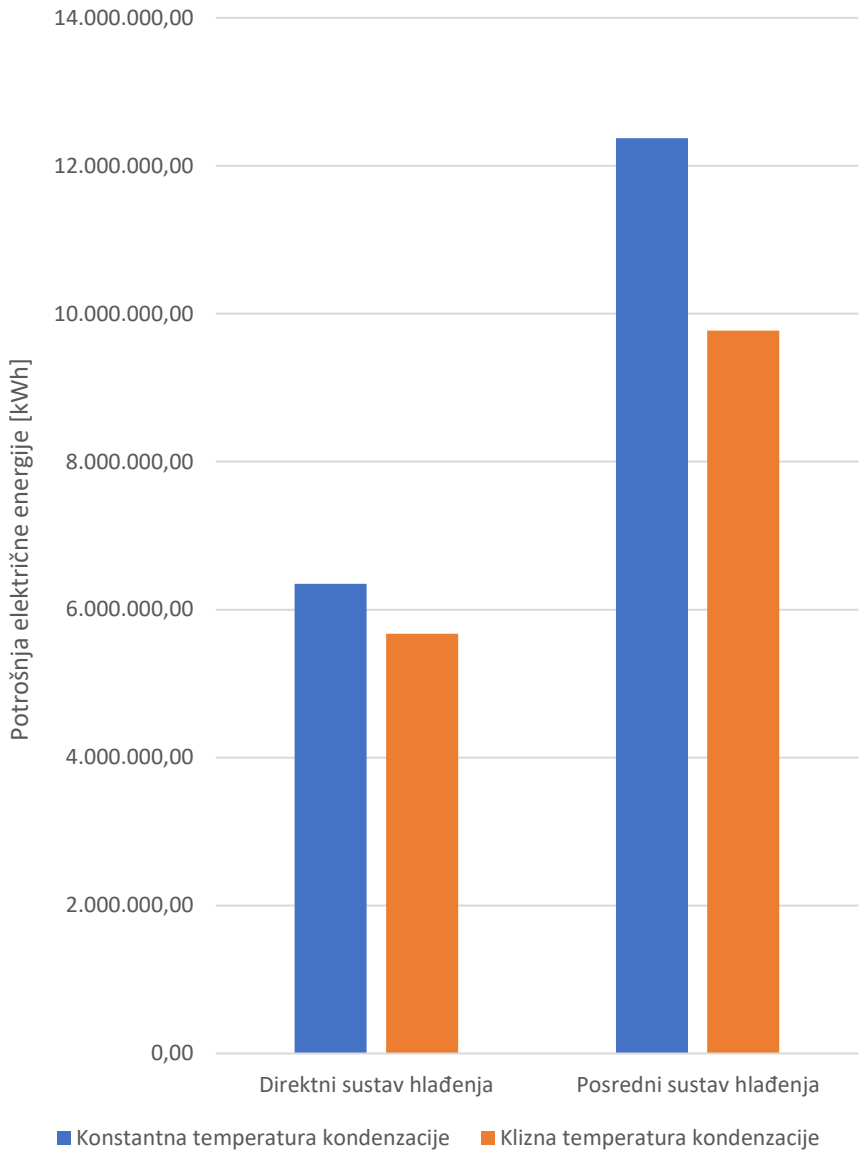
Snaga kompresora potrebna za komprimiranje navedenog protoka radne tvari iznosi:

$$P_{kom,ch} = q_{m,ch} * (h_2{}' - h_1{}') \tag{45}$$

Toplinski tok predan na kondenzatoru dobiva se iz izraza:

$$\phi_{kon} = q_{m,ch} * (h_2{}' - h_3{}') \tag{46}$$

Temeljem prethodno prikazanog proračuna dobiveni su podaci ukupne godišnje potrošnje električne energije s konstantnom i kliznom temperaturom kondenzacije. Slika 11 prikazuje ukupnu potrošnje energije za dva navedena slučaja.



Slika 11 Godišnja potrošnja električne energije rashladnog sustava

Ukupno smanjenje potrošnje električne energije primjenom klizne temperature kondenzacije iznosi 3.280.289,20 kWh. Uz prosječnu cijenu električne energije za 2021. godinu od 0,677 kn/kWh, godišnja ušteda primjenom sustava regulacije temperature kondenzacije iznosila bi 2.220.640,77 kn.

4. Utjecaj leda na rashladni proces

U rashladnim komorama za skladištenje duboko smrznute robe i tunelima za duboko zamrzavanje potrebno je održavati nisku temperaturu zraka kako bi se sačuvala kvaliteta i dugovječnost proizvoda. Temperature isparavanja radne tvari kreću se u rasponu od -30°C do -45°C, značajno ispod temperature smrzavanja vode. Zbog navedenog razloga dolazi do kristalizacije vodene pare u kontaktu s izmjenjivačkom površinom, odnosno zaleđivanja isparivača.

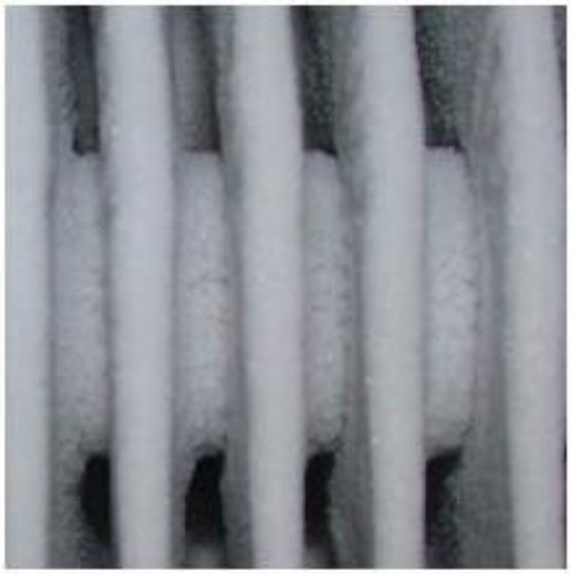
Struktura leda koji se formira na isparivaču ovisi o velikom broju faktora poput temperature izmjenjivačke površine, temperature rosišta zraka, relativne vlažnosti zraka i brzini strujanja zraka kroz isparivač.

Unutar tunela za duboko zamrzavanje kod vrlo niskih temperatura isparavanja od oko -40°C dolazi do formiranja porozne strukture leda koja se sastoji do individualnih kristala leda s brojnim džepovima zraka kako prikazuje slika 12. Ovakva struktura karakteristična je za vrlo niske temperature isparavanja i visoku vlažnost zraka. Obzirom na nisku gustoću, navedena struktura leda blokira protok zraka kroz isparivač za relativno kratak vremenski period rada. Ipak, zbog porozne i lagane strukture moguće je mehaničko čišćenje isparivača za razliku od čvrste strukture leda. Za poroznu strukturu leda česta je pojava odnošenje manjeg sloja leda uslijed naglog udara struje zraka.

Slika 12 Porozna struktura leda [1]

Hladnjače za skladištenje prethodno smrznute robe održavanju nešto višu temperaturu od tunela za duboko zamrzavanje. Temperatura isparavanja održava se na oko -30°C i zrak u hladnjači ima nešto nižu relativnu vlažnost što rezultira gušćom strukturom leda koja je čvršće

vezana za površinu isparivača. Gusta struktura leda prikazana je na slici 13. Za uklanjanje navedene vrste leda potrebno je primijeniti neku od metoda odleđivanja isparivača.

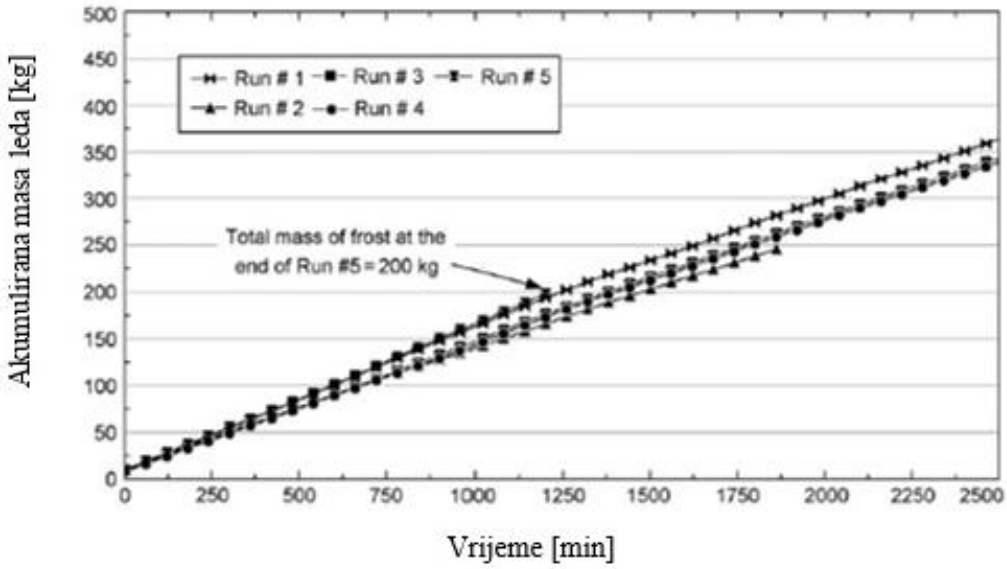


Slika 13 Gusta struktura leda [2]

Slika 14 prikazuje razlike u strukturi leda formiranom na površini izmjenjivača u ovisnosti o temperaturi isparavanja. S lijeva na desno odgovarajuće temperature isparavanja su -10°C, -20°C i -30°C. Iz slike 14 je jasno vidljivo kako niža temperatura isparavanja, odnosno veća razlika temperatura zraka i površine isparivača rezultira povećanjem poroznosti strukture leda kako je prethodno objašnjeno.

Slika 14 Usporedba strukture leda pri različitim temperaturama isparavanja [1]

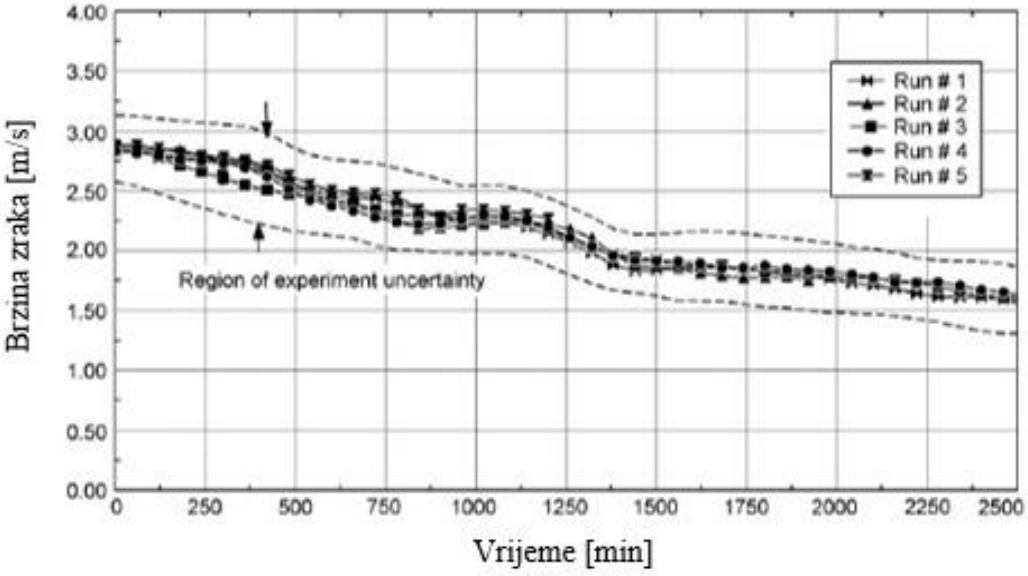
Eksperimentalno istraživanje radnih performansi industrijskih isparivača [13] pokazalo je kako količina leda akumuliranog u isparivaču raste približno linearno s vremenom. Slika 15 pokazuje porast ukupne mase leda u ovisnosti o vremenu rada.



Slika 15 Ukupna akumulirana masa leda u isparivaču [13]

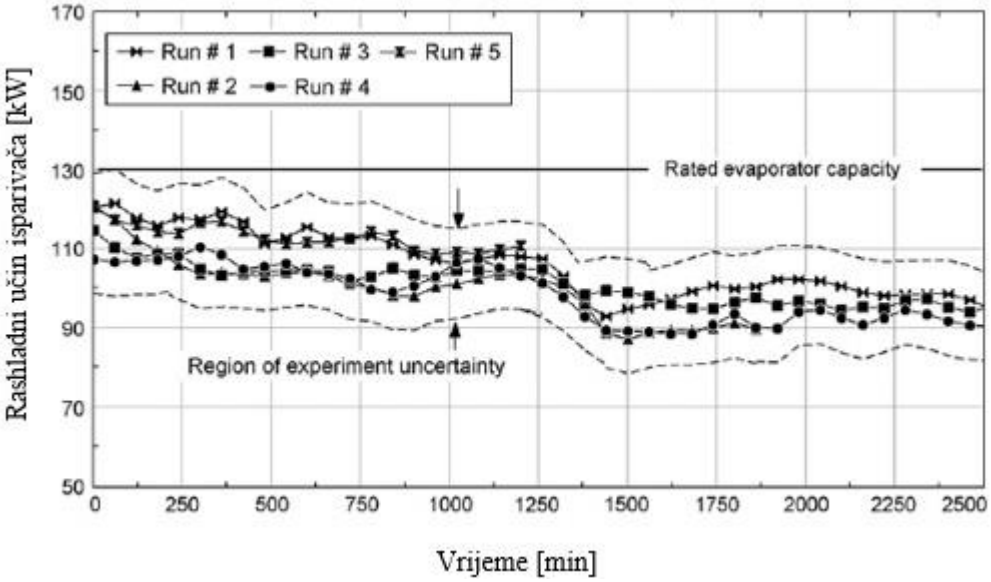
Akumulacija led na stijenki isparivača određena je u [13] kao umnožak protoka zraka i razlike relativnih vlažnosti ulazne i izlazne struje zraka.

Porast debljine leda na stijenki isparivača ima za posljedicu smanjenje poprečnog presjeka strujanja zraka. Osim toga, sloj leda povećava otpor strujanju zraka uzrokujući veći pad tlaka na isparivaču. Slika 16 prikazuje smanjenje brzine strujanja zraka s porastom debljine leda.



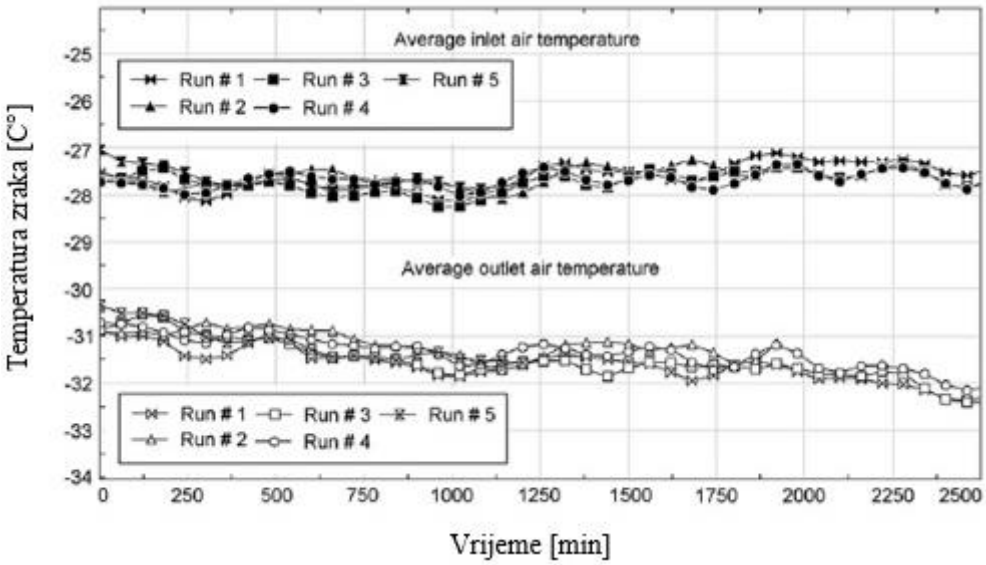
Slika 16 Brzina strujanja zraka na izlazu iz isparivača [13]

Smanjenje brzine zraka i poprečnog presjeka strujanja rezultira smanjenjem protoka zraka kroz izmjenjivač. Uslijed smanjenja protoka zraka smanjuje se i kapacitet isparivača kako je prikazano na slici 17.



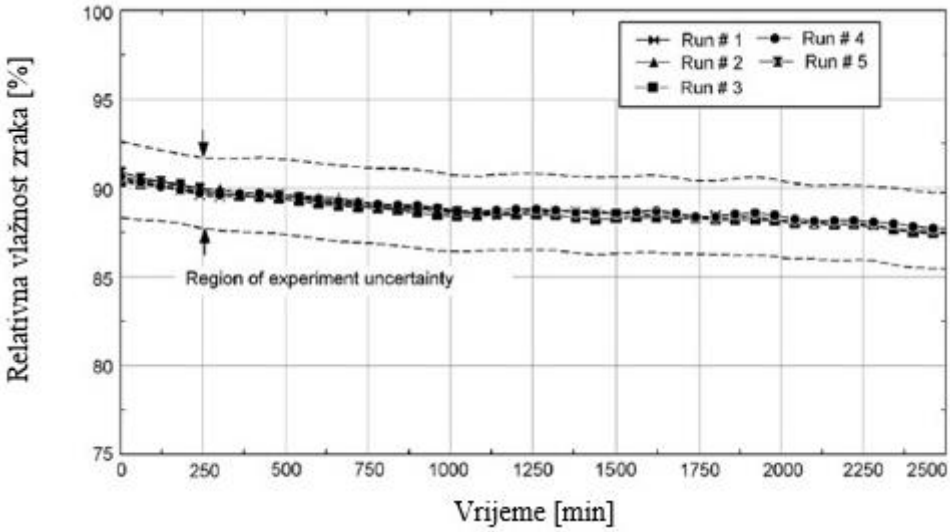
Slika 17 Rashladni učin isparivača u ovisnosti o vremenu rada [13]

Iako naslage leda na isparivaču predstavljaju dodatan toplinski otpor prolasku topline, zbog smanjenog protoka zraka kroz isparivač, temperatura zraka na izlazu iz isparivača pada, odnosno temperaturna razlika ulaznog i izlaznog zraka se povećava kako prikazuje slika 18.



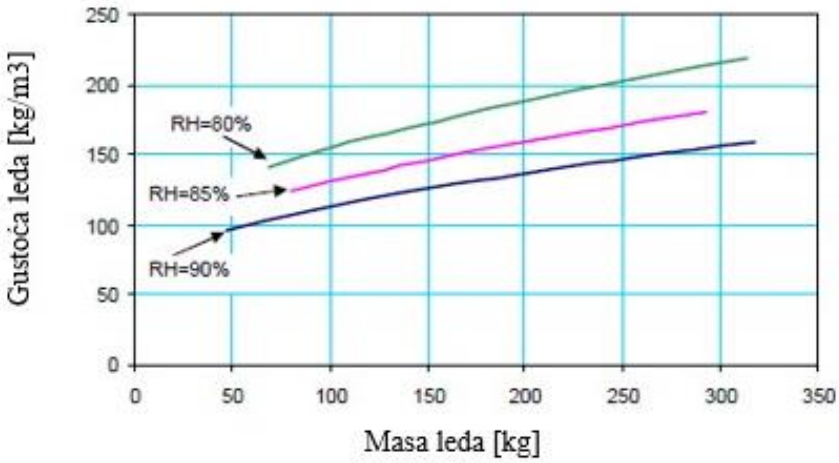
Slika 18 Ulazna i izlazna temperatura zraka u ovisnosti o vremenu [13]

Mjereni podaci dobiveni eksperimentalno u [13] pokazuju višestruki negativan utjecaj na učinkovitost rashladnog procesa. Tijekom trajanja eksperimenta, rashladna komora bila je zatvorena čime je onemogućen ulaz vanjskog zraka u prostor komore. Zbog navedenog je relativna vlažnost s vremenom opadala zbog kristalizacije vodene pare na stijenkama isparivača kako prikazuje slika 19.



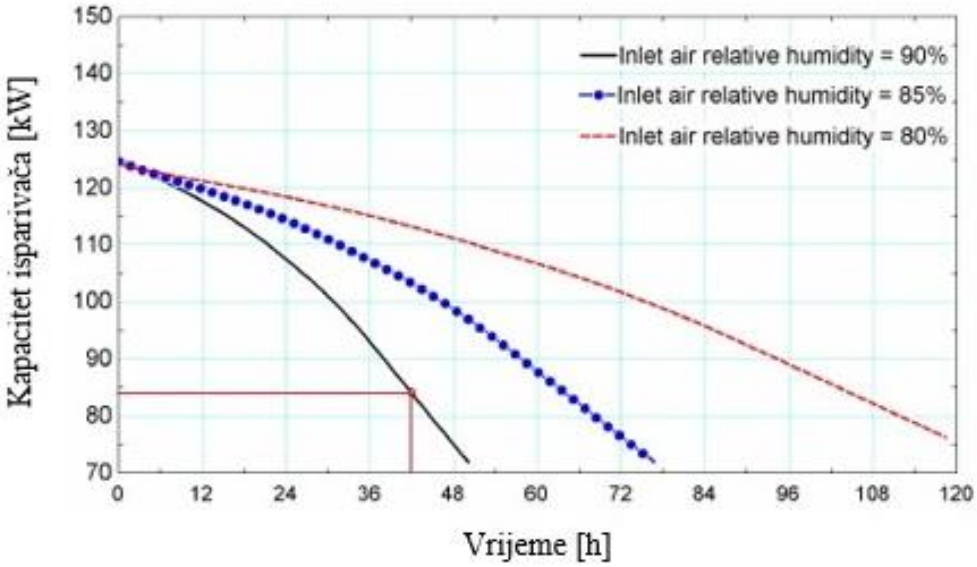
Slika 19 Relativna vlažnost zraka u komori u ovisnosti o vremenu [13]

Relativna vlažnost zraka iznimno je važan podatak kod analize utjecaja leda na performanse isparivača kako pokazuje [12]. Gustoća leda izravno je povezana s relativnom vlažnosti ulaznog zraka. Pri većim vrijednostima relativne vlažnosti, na stijenkama isparivača formira se sloj leda manje gustoće kako pokazuje slika 20.



Slika 20 Gustoća leda u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka [12]

Manja gustoća leda uzrokuje brži rast debljine sloja leda čime dolazi do blokade presjeka strujanja zraka i naglog pada kapaciteta isparivača kako prikazuje slika 21.



Slika 21 Pad kapaciteta isparivača za različite relativne vlažnosti ulaznog zraka

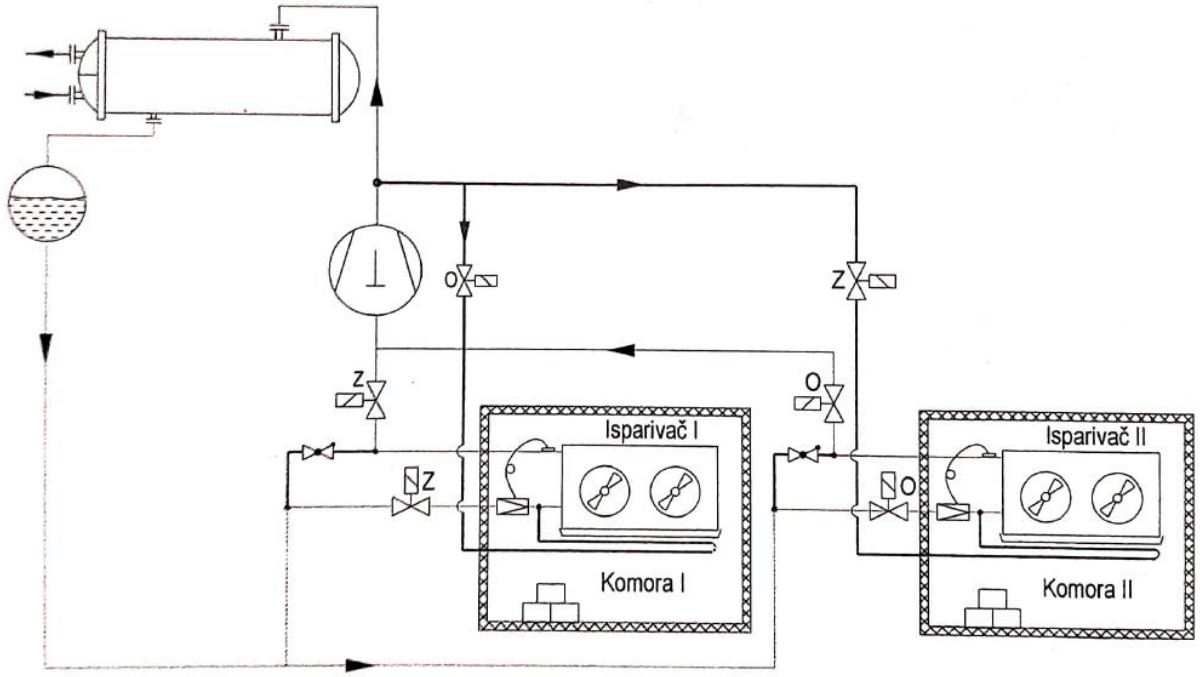
Usporede li se rezultati eksperimenta [12] i modela [13], vidi se da model daje dobru procjenu pada kapaciteta za vrijednost relativne vlažnosti 90%. Ipak, mjerenja pokazuju višu vrijednost kapaciteta isparivača na kraju eksperimenta što se može objasniti linearnim padom relativne vlažnosti ulaznog zraka kako prikazuje slika 19.

5. Odleđivanje vrućim parama radne tvari

Negativan utjecaj leda na učinkovitost rashladnog procesa opisan je u prethodnom poglavlju. Kako bi se postigla zadovoljavajuća učinkovitost rashladnog procesa i zadržao visoki rashladni učin potrebno je periodički odleđivati isparivače.

Postupak odleđivanja isparivača vrućim parama radne tvari često se primjenjuje u industrijskim postrojenjima s tunelima za dubokom zamrzavanje i hladnjačama za skladištenje smrznute robe. Obzirom da se navedeni sustavi sastoje od velikog broja rashladnih komora nužna je mogućnost odleđivanja pojedinih isparivača bez prekida rada isparivača ostalih komora. Shema izvedbe sustava s dva isparivača prikazana je na slici 22.

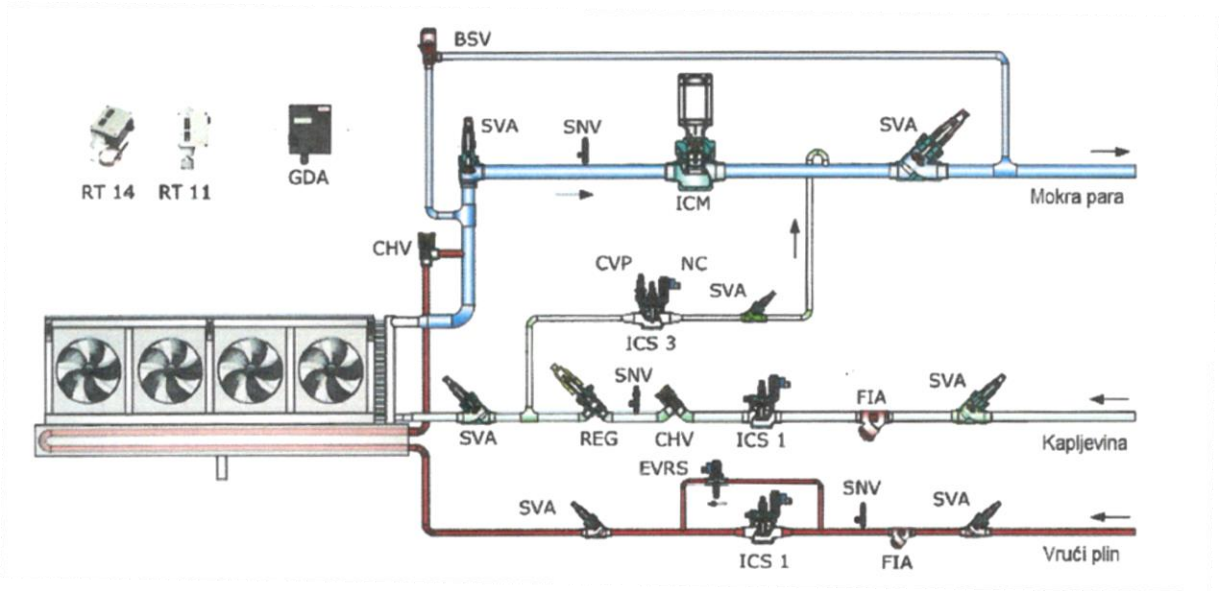
Slika 22 prikazuje pojednostavljeni prikaz sustava s jednostupanjskom kompresijom u kojemu se provodi odleđivanje isparivača u komori I, dok isparivač u komori II radi u režimu hlađenja. Oznake Z simboliziraju zatvoreni ventil, dok oznaka O označava otvoreni ventil. Pregrijane pare radne tvari na izlazu iz kompresora vode se prema isparivaču komore I koji se odleđuje, te se nakon kondenzacije radna tvar vodi kapljevinskim vodom do isparivača koji hladi zrak u komori II. Ovakva izvedba sustava omogućava istovremeno odleđivanje isparivača uz kontinuirano hlađenje preostalih komora. Slika 22 prikazuje takozvane „suhe“ isparivače kod kojih se na izlazu iz isparivača radna tvar nalazi u stanju pregrijane pare. Češće se u primjeni u industriji koriste amonijačni sustavi koji koriste „mokre“ isparivače kod kojih se na izlazu iz isparivača nalazi mokra para koja se potom vodi u odvajače gdje se razdvajaju kapljevina i suhozasićena para koja se potom vodi do kompresora.



Slika 22 Shema odleđivanja isparivača Komore I vrućim parama radne tvari

Rashladni amonijačni sustavi s odleđivanjem isparivača vrućim parama dolaze u dvije osnovne izvedbe. Trocijevni sustavi sastoje se od kapljevinske cijevi kroz koju se pumpama distribuira kapljevina iz odvajača, usisne cijevi kroz koju struji mokra para iz isparivača prema odvajaču i cijevi vrućeg plina kroz koji struje pregrijane pare radne tvari iz kompresora prema isparivaču. Shema trocijevnog sustava prikazana je na slici 23. U ovoj izvedbi kondenzat nastao odleđivanjem isparivača prigušuje se na tlak isparavanja i odvodi u odgovarajući odvajač u kojem vlada navedeni tlak. Prilikom prigušivanja kondenzata na tlak isparavanja nastaje mokra para pri čemu se suhozasićena para odvodi pomoću niskotlačnih kompresora. Visokotlačni kompresori moraju potom istu paru komprimirati na tlak kondenzacije što predstavlja dodatno opterećenje na sustav.

Četvero cijevni sustav kompleksnija je izvedba koja za razliku od trocijevnog sustava sadrži poseban cjevovod za odvod kondenzata nastalog odleđivanjem iz isparivača. Prednost ove izvedbe je u tome što para nastala prigušivanjem kondenzata ne mora biti komprimirana u niskotlačnim već samo u visokotlačnim kompresorima. Na taj način smanjuje se potrošnja električne energije za pogon kompresora, ali se istovremeno povećava investicijski trošak prilikom ugradnje sustava.



Slika 23 Shema sustava s odleđivanjem isparivača vrućim parama radne tvari [4]

Ciklus odleđivanja isparivača slijedi određeni raspored kako bi se osigurao ispravan i siguran prijelaz isparivača iz faze hlađenja u fazu odleđivanja i obrnuto.

5.1. Uklanjanje kapljevite radne tvari

Prva faza početka odleđivanja isparivača je uklanjanje kapljevite radne tvari. Svrha uklanjanja kapljevite radne tvari iz isparivača je minimiziranje ukupne mase isparivača koja se mora zagrijati prilikom odleđivanja. Manja masa kapljevine u isparivaču omogućava brže zagrijavanja isparivača jer se kondenzacija vrućeg plina odvija u čitavom volumenu isparivača. Kako bi se uklonila kapljevina iz isparivača magnetski ventil u kapljevinskom vodu se zatvara, a ventil u usisnom vodu kroz koji struji mokra para iz isparivača ostaje otvoren te ventilatori ostaju uključeni. Vrijeme potrebno za uklanjanje radne tvari ovisi o unutarnjem volumenu isparivača i intenzitetu izmjene topline između zraka i zaostale kapljevine radne tvari. Procijenjeno vrijeme trajanja uklanjanja kapljevine iz isparivača iznosi od 5 do 10 minuta. [4] Postoje izvedbe sustava u kojima se kapljevita radna tvar uklanja iz isparivača na način da se potiskuje vrućim parama pri čemu vruće pare struje iznad razine kapljevine i potiskuje ju u usisni vod. Na ovaj način se skraćuje vrijeme trajanja prve faze ali također dolazi do opasnosti od strujanja vrućih para u usisni vod. Također može doći do nakupljanja kapljevine u usisnom

vodu i pojave hidrauličkog udara. Zbog navedenog se najčešće primjenjuje prethodno navedena metoda zagrijavanja zaostale kapljevine vrućim parama.

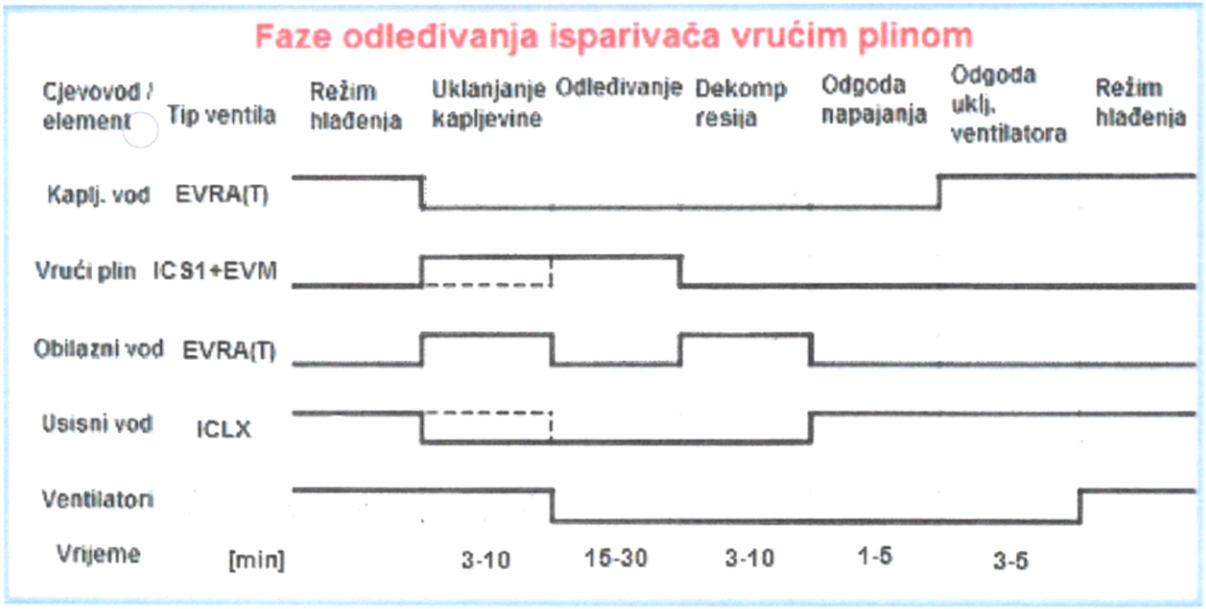
Nakon uklanjanja kapljevite radne tvari iz isparivača zatvara se ventil u usisnome vodu. Ventil u usisnom vodu, označen ICM na slici 23, najčešće je pogonjen električnom energijom, ali može biti pogonjen i vrućim plinom ili komprimiranim zrakom. Potrebno je određeno vrijeme kako bi se ventil u potpunosti zatvorio što je potrebno uzeti u obzir kako ne bi došlo do strujanja pregrijanih para u usisni vod.

5.2. Dovod pregrijanih para radne tvari u isparivač

Po završetku zatvaranja ventila u usisnom vodu započinje punjenje isparivača vrućim parama radne tvari na visokom tlaku. Tijekom postupka odleđivanja ventilatori ostaju isključeni kako bi se smanjio toplinski tok predan zraku u komori. Budući da postoji velika razlika tlakova vrućeg plina i tlaka u isparivaču potrebno je postupno otvaranje ventila na strani vrućeg plina kako bi se izbjegli udari uslijed nagle ekspanzije plina. Zbog toga se često u praksi ugrađuju dva paralelno spojena ventila s različitim karakteristikama ventila. Na početku se otvori ventil manjih dimenzija te tlak u isparivaču postupno raste i postupno se izjednačava s tlakom vrućeg plina. Nakon izjednačavanja tlaka otvara se ventil većih dimenzija i potreban protok vrućeg plina počinje strujati prema isparivaču. Dobra praksa pokazala je da se omjer kapaciteta dvaju ventila kreće u rasponu 1:5 do 1:6. Vremenska odgoda otvaranja većeg ventila nakon otvaranja manjeg ventila ovisi o veličini isparivača i uobičajeno iznosi 30 do 150 sekundi. Alternativno rješenje je korištenje jednog motornog ventila pri čemu brzina otvaranja ventila može biti konstantna ili se povećavati sa stupnjem otvorenosti ventila. Preporuka pri dimenzioniranju ventila je da protok vrućeg plina treba biti 2 do 3 puta veći od protoka radne tvari u režimu hlađenja.

5.3. Dekompresija

Nakon završetka faze odleđivanja potrebno je tlak u isparivaču postepeno spustiti na vrijednost tlaka isparavanja. Protok vrućeg plina prema isparivaču se zaustavlja, zatvaraju se ventili u cjevovodu vrućeg plina i dozvoljava se određeno vrijeme, između 1 i 3 minute, da se gravitacijski odvoje kapljevita i plinovita faza radne tvari. Tlak se potom postupna snižava pomoću dvostupanjskog ventila pogonjenog vrućim plinom. Ventil u usisnom vodu je u početnoj fazi otvoren na 10% punog kapaciteta i ostaje na istoj razini otvorenosti sve dok razlika tlakova ne padne ispod 1,25 bar, nakon čega se otvara drugi stupanj i ventil radi s punim kapacitetom. Po postizanju vrijednosti tlaka isparavanja otvara se magnetski ventil u kapljevinskom vodu, a ventilatori ostaju isključeni. Na taj način se omogućava zamrzavanje kapljica kondenzata na isparivačkim sekcijama kako bi se spriječilo odnošenje kapljica strujom zraka u prostor komore. Ventilatori uobičajeno ostaju van pogona nekoliko minuta nakon otvaranja magnetnog ventila u kapljevinskom vodu.



Slika 24 Prikaz faza odleđivanja isparivača vrućim plinom

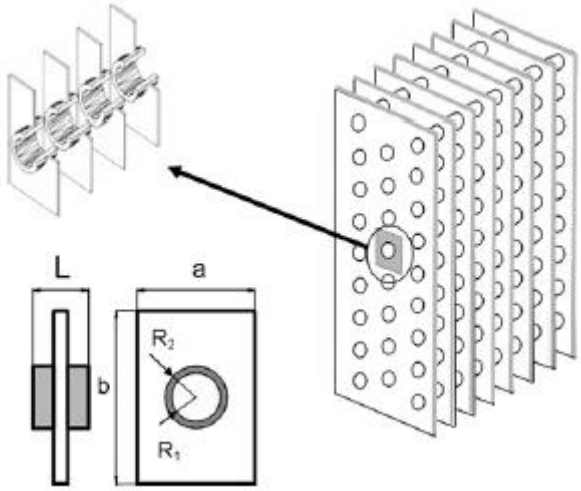
6. Model odleđivanja isparivača

Zahtjev za održavanjem izrazito niske temperature u prostoru komora za skladištenje duboko smrznutog mesa ima za posljedicu stvaranje naslaga leda na izmjenjivačkim površinama. Budući da su površina cijevi i lamela ispod 0°C, vodena para iz zraka kristalizira se u kontaktu s površinom što rezultira stvaranjem sloja leda koji se povećava s vremenom rada isparivača. Kako je objašnjeno u prethodnim poglavljima, sloj leda predstavlja dodatan toplinski otpor prolazu topline i smanjuje efikasnost isparivača te ga je stoga potrebno periodički odleđivati. U nastavku je prikazan razvijeni model odleđivanja isparivača vrućim parama radne tvari.

Unutar komore za skladištenje duboko smrznutog mesa instalirano je 10 isparivača prikazanih na slici 25. Isparivači su opremljeni s tri aksijalna ventilatora i orebrenog su tipa. Materijal cijevi je čelik, odabran za rashladnu tvar R717, a radi povećanja površine izmjene topline na cijevi su navučene aluminijske lamele.

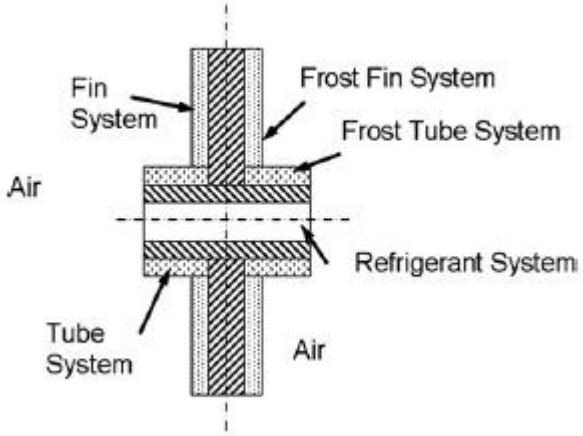
Slika 25 Izmjenjivač proizvođača Alfa laval

Obzirom na veliki volumen i površinu izmjene topline potrebno je definirati karakterističan element izmjenjivača, relativno malih dimenzija koji dobro opisuje zakonitosti izmjene topline. Prema [6], definiran je element prikazan na slici 26 i 27.



Slika 26 Karakterističan dio isparivača [6]

Obzirom na relativno jednostavnu geometriju isparivača, model isparivača razvijen je kao serijski spoj elemenata prikazanih na slici 26. Element se sastoji od dijela cijevi duljine 12 mm, što odgovara razmaku između susjednih lamela. Svakome elementu cijevi pripada dio lamele površine 92 x 79 mm i pripadajući slojevi leda na cijevi i lameli, kako prikazuje slika 27. Ovisno o fazi odleđivanja sustav može sadržavati dodatne dijelove koji nisu prikazani na slici 27, a o kojima se govori u nastavku poglavlja.



Slika 27 Dijelovi modela [6]

Prilikom izrade modela odleđivanja isparivača uvedena su određena pojednostavljenja i pretpostavke. Pretpostavljena je uniformna temperatura cijevi, lamele i ostalih dijelova modela. Navedena pretpostavka uvodi određenu grešku u model, posebice kod lamele koja zbog

relativno velike površine ima zamjetan gradijent temperature po visini. Entalpija na ulazu u izmjenjivač izjednačena je s entalpijom na izlazu iz kompresora. Pretpostavljeno je otapanje leda na kontaktnoj površini s cijevi i lamelom prema van, pri čemu je površina izmjene topline leda sa zrakom konstantna tijekom procesa odleđivanja. Koeficijenti prijelaza topline i toplinska svojstva definirana su kao konstantne vrijednosti. Pretpostavljena je slobodna konvekcija na zrak u komori, obzirom da su ventilatori ugašeni tijekom odleđivanja. Temperatura zraka u komori prilikom odleđivanja definirana je također kao konstantna vrijednost -25°C. Zanemareno je provođenje topline s elementa na element cijevi u smjeru strujanja radne tvari. Pretpostavljeno je da odleđivanje traje sve dok početna debljina leda ne postigne vrijednost nula. Pri većim debljinama leda moguće je odvajanje sloja leda uslijed gravitacijske sile prije potpunog otapanja.

6.1. Definiranje ulaznih parametara modela

Toplinska svojstva i koeficijenti prijelaza topline definirani su kao konstantne vrijednosti, kako je prethodno navedeno. Svojstva tvari preuzeta su iz [7], [8] i [9], a proračun koeficijenata prijelaza topline prikazan u nastavku preuzet je iz [10].

Koeficijent prolaza topline s vanjske strane cijevi, odnosno s leda na vanjski zrak proračunat je preko modela slobodne konvekcije oko dugačke horizontalne cijevi prema Churchill i Chu kako je navedeno u [10].

Grashofov broj dobiven je iz:

$$Gr_1 = \frac{g{d_v}^3(T_s - T_\infty)}{\nu^2 T_\infty} = 362\ 061 \tag{47}$$

Prandtlova značajka dobivena je prema izrazu:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = 0{,}72 \tag{48}$$

Rayleighova značajka slijedi iz izraza:

$$Ra_1 = Pr * Gr_1 = 260\ 684 \tag{49}$$

Nusseltov broj dobiva se iz jednadžbe:

$$Nu_1 = \left\{0{,}60 + 0{,}387{Ra_1}^{1/6}\left[1 + \left(\frac{0{,}559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-8/27}\right\}^2 = 10{,}05 \tag{50}$$

Naposlijetku, koeficijent prijelaza topline iznosi:

$$\alpha_{v1} = \frac{Nu_1\,\lambda}{d_v} = 6{,}02\frac{W}{m^2K} \tag{51}$$

Proračunati je i koeficijent prijelaza topline s lamele na zrak u komori, također prema Churchill i Chu, kako je prikazano u nastavku. Navedeni izrazi vrijede za slobodnu konvekciju uz vertikalnu ravnu stijenku.

Grashofov broj dobiven je iz izraza:

$$Gr_2 = \frac{gH^3(T_s - T_\infty)}{\nu^2 T_\infty} = 4{,}1 * 10^9 \tag{52}$$

Prandtlova značajka dobivena je prema izrazu:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = 0{,}72 \tag{53}$$

Rayleighova značajka slijedi iz izraza:

$$Ra_2 = Pr * Gr_2 = 2{,}95 * 10^9 \tag{54}$$

Nusseltov broj dobiva se iz jednadžbe:

$$Nu_2 = \left\{0{,}825 + 0{,}387{Ra_2}^{1/6}\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-8/27}\right\}^2 = 172{,}24 \tag{55}$$

Naposlijetku, koeficijent prijelaza topline iznosi:

$$\alpha_{v2} = \frac{Nu_2\,\lambda}{H} = 4{,}60\frac{W}{m^2K} \tag{56}$$

Vrijednost koeficijenta prijelaza topline na vanjski zrak određena je kao aritmetička sredina dvaju vrijednosti.

$$\alpha_v = \frac{\alpha_{v1} + \alpha_{v2}}{2} = 5{,}31\frac{W}{m^2K} \tag{57}$$

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi određen je prema modelu prisilne konvekcije u cijevi prema [10], modelu Petukhova.

Protok radne tvari kroz isparivač tijekom odleđivanja određen je prema preporuci da protok bude 2 do 3 puta veći od protoka tijekom procesa hlađenja. Protok radne tvari dobiven je iz izraza:

$$q_{mRT} = \frac{2\, q_{mRT,hlađenje,uk}}{n_{isparivača}} = 0{,}1394 \frac{kg}{s} \tag{58}$$

Brzina strujanja radne tvari dobivena je iz:

$$w = \frac{4\, q_{mRT}}{\rho\, {d_u}^2 \pi} = 40{,}4 \frac{m}{s} \tag{59}$$

Reynoldsov broj slijedi iz izraza:

$$Re = \frac{\rho\, w\, d_u}{\eta} = 493\,076 \tag{60}$$

Prandtlova značajka dobivena je prema izrazu:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = 1{,}25 \tag{61}$$

Pomoćna proračunska veličina f dobiva se iz jednadžbe:

$$f = (1{,}82 \log Re - 1{,}64)^{-2} = 0{,}0132 \tag{62}$$

Nusseltov broj računa se prema:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}\, Re\, Pr}{1{,}07 + 12{,}7\sqrt{\frac{f}{8}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}} = 792{,}18 \tag{63}$$

Te je vrijednost koeficijenta prijelaza topline konačno:

$$\alpha_u = \frac{Nu * \lambda}{d_u} = 855{,}55 \frac{W}{m^2 K} \tag{64}$$

Koeficijent prijelaza topline s cijevi na vodeni film tijekom procesa odleđivanja pretpostavljen je prema [10] iz karakterističnih vrijednosti za slobodnu konvekciju oko cijevi kao vrijednost.

$$\alpha_w = 150 \frac{W}{m^2 K} \tag{65}$$

Gustoća sloja leda pretpostavljena je na vrijednost:

$$\rho_{led} = 250 \frac{kg}{m^3} \tag{66}$$

koja odgovara sredini raspona vrijednosti iz [11].

Toplinska vodljivost leda kao funkcija gustoće leda određena je prema izrazu iz [11]:

$$\lambda_{led} = 0{,}132 + 3{,}13 * 10^{-4}\, \rho_{led} + 1{,}6 * 10^{-7}\, {\rho_{led}}^2 = 0{,}220 \frac{W}{mK} \tag{67}$$

Temperatura radne tvari na ulazu u pojedini element isparivača dobivena je kao funkcija entalpije na ulazu u element. Ovisno o vrijednosti entalpije, temperatura radne tvari računa se prema navedenim izrazima, za pregrijanu paru, mokru paru i pothlađenu kapljevinu. Funkcijske vrijednosti vrijede za tlak koji odgovara temperaturi kondenzacije 35°C.

Za pregrijanu paru vrijedi funkcijska ovisnost:

$$T_{RT}(h) = 0{,}3726\, h - 576{,}85\ [°C]\ ;\ \ h > 1634{,}11 \frac{kJ}{kg} \tag{68}$$

Za mokru paru temperatura ima konstantnu vrijednost.

$$T_{RT}(h) = 35\ [°C]\ ;\ 511{,}56 < h < 1634{,}11 \frac{kJ}{kg} \tag{69}$$

Za pothlađenu kapljevinu vrijedi funkcijska ovisnost:

$$T_{RT}(h) = -3 * 10^{-5}\, h^2 - 576{,}85 + 0{,}2377\, h - 78{,}701\ ;\ \ h < 511{,}56 \frac{kJ}{kg} \tag{70}$$

Proračun ulaznih parametara modela i vrijednosti toplinskih svojstava preuzete iz navedenih izvora nalaze se u Prilogu 2.

6.2. *Faze odleđivanja isparivača*

Model odleđivanja isparivača podijeljen je u pet faza navedenih kako slijede: zagrijavanje, odleđivanje cijevi, odleđivanje cijevi i lamele, odleđivanje lamele, suho grijanje. U svakoj od navedenih faza vrijede različite zakonitosti izmjene topline te se unutar modela zakonitosti,

prema kojima se računaju temperature komponenata i debljine leda, mijenjaju ovisno o vrijednostima temperatura i ostalih parametara. U nastavku su opisane zakonitosti koje vrijede tijekom trajanja pojedine faze odleđivanja.

6.2.1. Faza 1 – zagrijavanje

Zagrijavanje je u sklopu modela definirano kao faza tijekom koje se odvija zagrijavanje svih elemenata modela, uključujući led na cijevi i lameli. Obzirom da odleđivanju prethodi proces hlađenja, pretpostavljeno je da se sve komponente modela – cijev, lamela, led na cijevi i isparivaču – u početnom trenutku nalaze na temperaturi -25°C, što odgovara temperaturi zraka u komori. Potrebno je stoga prije početka otapanja leda zagrijati led do temperature 0°C, a s time i ostale dijelove isparivača.

Zagrijavanje se odvija prema sljedećim zakonitostima:

Za radnu tvar vrijedi jednadžba:

$$q_{m,RT}(h_{ul} - h_{iz}) - \alpha_u A_{cijev,u}\left(T_{RT} - T_{cijev}\right) = 0 \tag{71}$$

Za cijev vrijedi jednadžba:

$$m_{cijev}\, c_{cijev}\, \frac{dT_{cijev}}{dt} = \phi_{RT,cijev} - \phi_{cijev,led} - \phi_{cijev,lamela} \tag{72}$$

Pri čemu su:

$$\phi_{RT,cijev} = \alpha_u A_{cijev,u}\left(T_{RT} - T_{cijev}\right) \tag{73}$$

$$\phi_{cijev,led} = \frac{2\pi(L - \delta_{lamela})\lambda_{cijev}}{ln\left(\frac{d_v}{d_u}\right)}\left(T_{cijev} - T_{led}\right) \tag{74}$$

$$\phi_{cijev,lamela} = \frac{2\pi\, \delta_{lamela}\, \lambda_{cijev}}{ln\left(\frac{d_v}{d_u}\right)}\left(T_{cijev} - T_{lamela}\right) \tag{75}$$

Za sloj leda na cijevi vrijedi jednadžba:

$$m_{led}\, c_{led}\, \frac{dT_{led}}{dt} = \phi_{cijev,led} + \phi_{lamela,led} - \phi_{led,led\ lamela} - \phi_{led,zrak} \tag{76}$$

Pri čemu su:

$$\phi_{lamela,led} = \frac{\lambda_{lamela}}{\delta_{lamela}} \left[\left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 - {d_v}^2\right] \frac{\pi}{2} \left(T_{lamela} - T_{led}\right) \tag{77}$$

$$\phi_{led,led\ lamela} = \frac{4\pi\ \delta_{led\ lamela,0}\ \lambda_{led}}{ln\left(\frac{d_v + 2\ \delta_{led,0}}{d_v}\right)} \left(T_{led} - T_{led\ lamela}\right) \tag{78}$$

$$\phi_{led,zrak} = \alpha_v \left(d_v + 2\ \delta_{led,0}\right)\left(L - \delta_{lamela} - 2\ \delta_{led\ lamela,0}\right)\pi \left(T_{led} - T_{zrak}\right) \tag{79}$$

Vrijednost $\phi_{cijev,led}$ dobiva se iz jednadžbe (74).

Za lamelu vrijedi jednadžba:

$$m_{lamela}\ c_{lamela} \frac{dT_{lamela}}{dt} = \phi_{cijev,lamela} - \phi_{lamela,led} - \phi_{lamela,led\ lamela} \tag{80}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{lamela,led\ lamela} = \frac{\lambda_{lamela}}{\delta_{lamela}} * 2\left[ab - \left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 \frac{\pi}{4}\right] \left(T_{lamela} - T_{led\ lamela}\right) \tag{81}$$

Vrijednost $\phi_{cijev,lamela}$ dobiva se iz jednadžbe (75), a $\phi_{lamela,led}$ iz jednadžbe (77).

Za led na lameli vrijedi jednadžba:

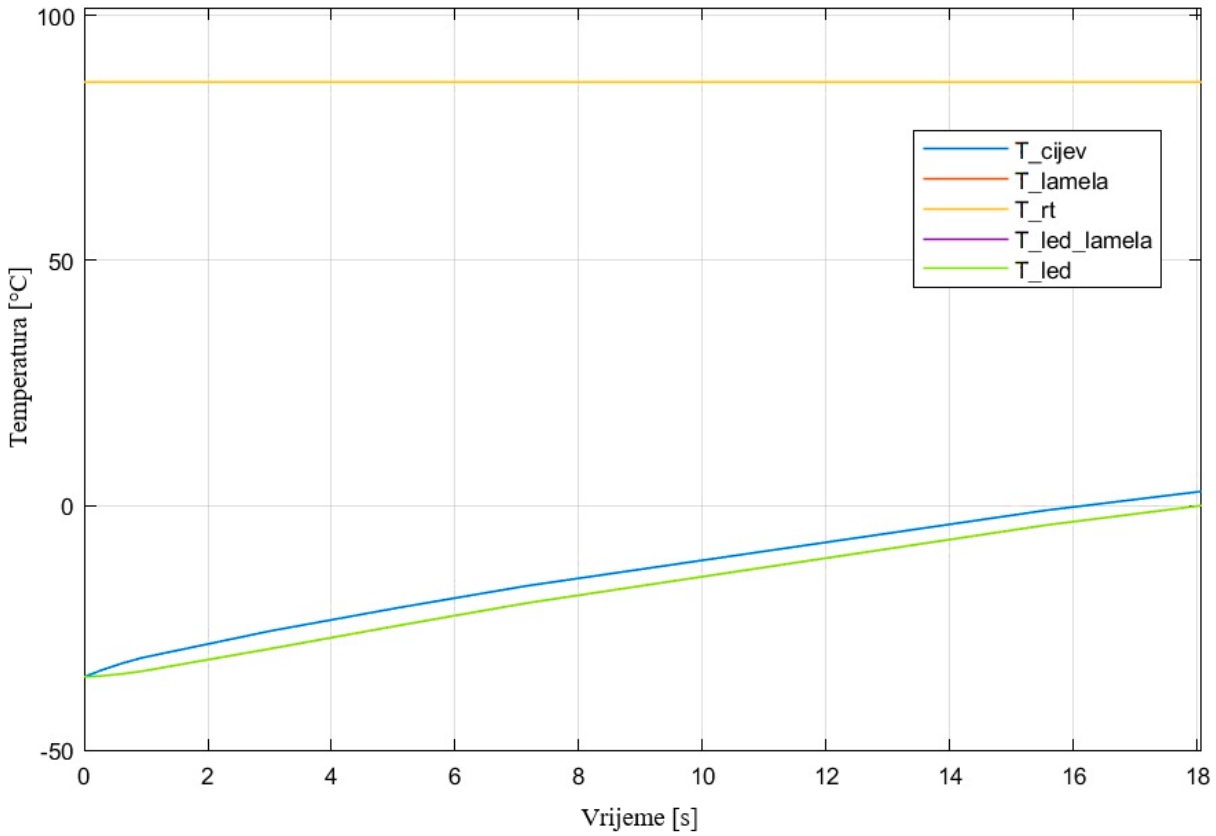
$$m_{led\ lamela}\ c_{\ led\ lamela} \frac{dT_{led\ lamela}}{dt} = \phi_{led,led\ lamela} + \phi_{lamela,led\ lamela} - \phi_{led\ lamela,zrak}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{led\ lamela,zrak} = \alpha_v * 2\left[ab - \left(d_v + 2\ \delta_{led,0}\right)^2 \frac{\pi}{4}\right] \left(T_{led\ lamela} - T_{zrak}\right) \tag{83}$$

Vrijednosti $\phi_{led,led\ lamela}$ dobiva se iz jednadžbe (78), a $\phi_{lamela,led\ lamela}$ iz jednadžbe (81).

Navedene jednadžbe opisuju fazu zagrijavanja. Slika 28 prikazuje kretanje temperatura pojedinih komponenata tijekom faze zagrijavanja, za element na ulazu u isparivač.



Slika 28 Kretanje temperatura tijekom faze zagrijavanja

Temperatura radne tvari na ulazu u isparivač je konstantna i odgovara temperaturi na izlazu iz kompresora. Temperatura radne tvari ostaje konstantna u vremenu za element cijevi na ulazu u isparivač kroz sve faze odleđivanja. Iz slike 28 je vidljivo kako s vremenom raste temperatura cijevi, te se faza zagrijavanja završava kada temperatura leda postigne vrijednost od 0°C. Temperatura lamele i leda na lameli ne razlikuje se značajno od temperature leda na cijevi te su stoga prikazane jednom krivuljom. Nakon završetka zagrijavanja počinje faza odleđivanja cijevi isparivača.

6.2.2. Faza 2 – odleđivanje cijevi

Odleđivanje cijevi započinje nakon što temperatura leda na cijevi dosegne temperaturu 0°C i završava se nakon što temperatura leda na lameli postigne istu temperaturu. Tijekom odleđivanja cijevi, počinje otapanje leda na cijevi dok se led na lameli još uvijek zagrijava. Odleđivanje cijevi traje izrazito kratak vremenski period, posebice za manje debljine leda. Ipak unutar navedene faze vrijede različite zakonitosti u odnosu na zagrijavanje i fazu otapanja leda na cijevi i lameli. Stvara se filmski sloj vode na cijevi te se mijenjaju uvjeti izmjene topline na površini cijevi. Jednadžbe koje opisuju fazu odleđivanja cijevi prikazane su u nastavku.

Za radnu tvar vrijedi jednadžba (71).

Za cijev vrijedi jednadžba:

$$m_{cijev}\, c_{cijev}\, \frac{dT_{cijev}}{dt} = \phi_{RT,cijev} - \phi_{cijev,w} - \phi_{cijev,lamela} \tag{84}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{cijev,w} = \alpha_w\, d_v \pi (L - \delta_{lamela}) \left(T_{cijev} - T_w\right) \tag{85}$$

Vrijednosti $\phi_{RT,cijev}$ dobiva se iz jednadžbe (73), a $\phi_{cijev,lamela}$ iz jednadžbe (75).

Za sloj vode između cijevi i leda vrijedi jednadžba:

$$m_w\, c_w\, \frac{dT_w}{dt} = \phi_{cijev,w} + \phi_{lamela,w} - \phi_{w,led} \tag{86}$$

Pri čemu su:

$$\phi_{lamela,w} = \alpha_w \left[\left(d_v + 2(\delta_{led,0} - \delta_{led})\right)^2 - {d_v}^2 \right] \frac{\pi}{2} \left(T_{lamela} - T_w\right) \tag{87}$$

$$\phi_{w,led} = \alpha_w \left[\left(d_v + 2(\delta_{led,0} - \delta_{led})\right) \pi (L - \delta_{lamela}) \right] \left(T_w - T_{led}\right) \tag{88}$$

Vrijednost $\phi_{cijev,w}$ dobiva se iz jednadžbe (85).

Za sloj leda na cijevi vrijedi jednadžba:

$$r_{led}\, \frac{dm_{led}}{dt} = \phi_{w,led} + \phi_{lamela,led} - \phi_{led,zrak} - \phi_{led,led_lamela} \tag{89}$$

Pri čemu su:

$$\frac{dm_{led}}{dt} = \rho_{led}\,\pi(L-\delta_{lamela})\big(d_v + 2(\delta_{led,0}-\delta_{led})\big)\frac{d\delta_{led}}{dt} \tag{90}$$

$$\phi_{lamela,led} = \frac{\lambda_{lamela}}{\delta_{lamela}}\left[\left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 - \left(d_v + 2(\delta_{led,0}-\delta_{led})\right)^2\right]\frac{\pi}{2}\,(T_{lamela}-T_{led}) \tag{91}$$

$$\phi_{led,led_lamela} = \frac{4\pi\,\delta_{led\ lamela,0}\,\lambda_{led}}{ln\left(\frac{d_v + 2\,\delta_{led,0}}{d_v + 2(\delta_{led,0}-\delta_{led})}\right)}\,(T_{led}-T_{led\ lamela}) \tag{92}$$

Vrijednosti $\phi_{w,led}$ dobiva se iz jednadžbe (88), a $\phi_{led,zrak}$ iz jednadžbe (79).

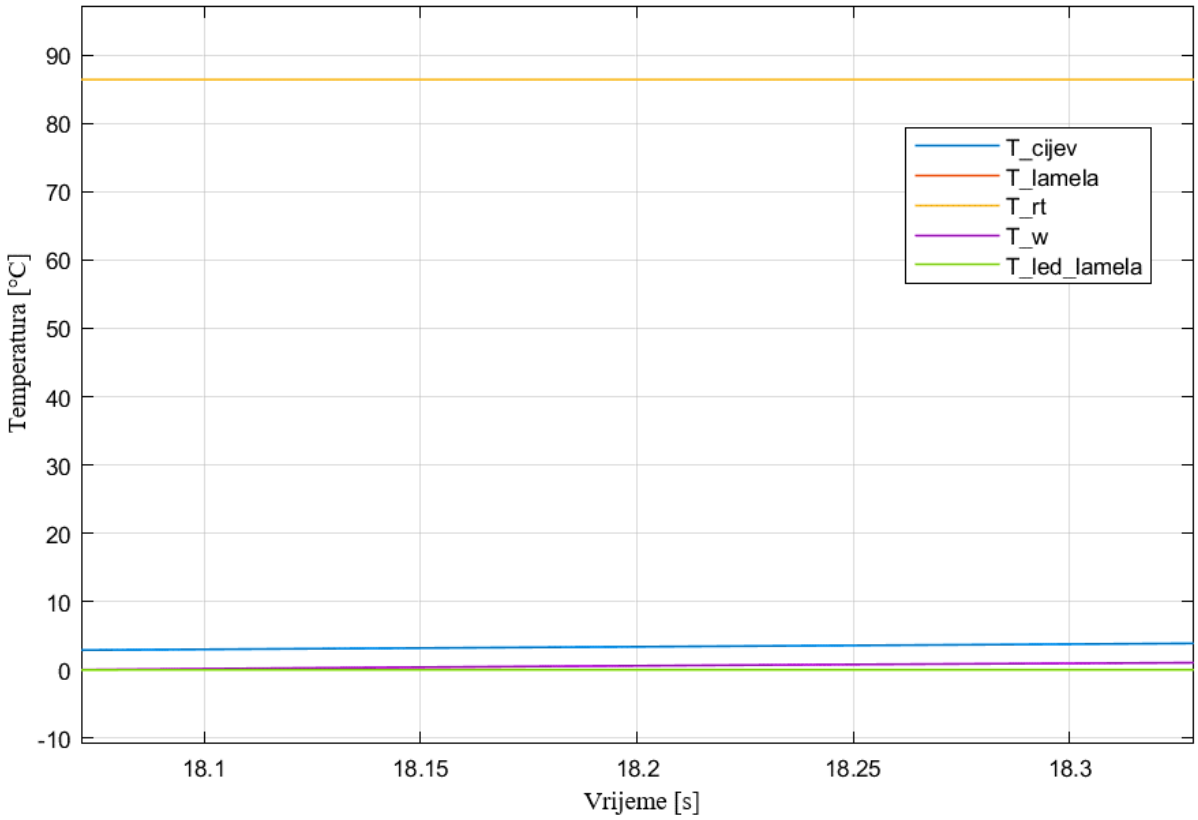
Za lamelu vrijedi jednadžba:

$$m_{lamela}\,c_{lamela}\,\frac{dT_{lamela}}{dt} = \phi_{cijev,lamela} - \phi_{lamela,led} - \phi_{lamela,led\ lamela} - \phi_{lamela,w} \tag{93}$$

Pri čemu se vrijednosti $\phi_{cijev,lamela}$, $\phi_{lamela,led}$, $\phi_{lamela,led\ lamela}$, $\phi_{lamela,w}$ dobivaju redom iz jednadžbi (75), (91), (81) i (87).

Za led na lameli vrijedi jednadžba (82).

Navedene jednadžbe opisuju fazu odleđivanja cijevi. Slika 29 prikazuje kretanje temperatura pojedinih komponenata tijekom faze odleđivanja cijevi, za element na ulazu u isparivač.



Slika 29 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja cijevi

Iz vremenske osi na slici 29 vidljivo je kako prethodno opisana faza traje izrazito kratak vremenski period. Velika vodljivost materijala lamele i mali toplinski kapacitet leda na lameli posljedica je navedenog fenomena. Već pri kratkom trajanju druge faze uočljivo je kako raste temperatura filmskog sloja vode, koji će u idućoj fazi služiti kao svojevrsni prijenosnik topline s cijevi na led. Prve dvije opisane faze traju relativno kratko u odnosu na ukupno trajanje procesa odleđivanja. Nakon završetka odleđivanja cijevi počinje faza odleđivanja cijevi i lamele.

6.2.3. Faza 3 – odleđivanje cijevi i lamele

Odleđivanje cijevi i lamele započinje kada led na cijevi i lameli postigne temperaturu taljenja, što pri normalnim uvjetima odgovara 0°C. Tijekom faze odleđivanje cijelog sustava pretpostavljeno je da su površine cijevi i lamele u kontaktu sa slojem vode koji nastaje uslijed otapanja leda. Tijekom trajanja faze 3, cijev i lamela predaju toplinu vodi, koja je zarobljena između cijevi/lamele i sloja leda kojemu predaju toplinu, na taj način smanjujući debljinu leda na odgovarajućoj površini i povećavajući količinu vode između leda i cijevi. Kontakt vode s cijevi i ledom ugrađen je kao pretpostavka modela tijekom cijelog trajanja faze 3. (voda ispunjava prostor između cijevi i leda)

Jednadžbe koje opisuju fazu odleđivanja cijevi i lamele navedene su u nastavku.

Za radnu tvar vrijedi jednadžba (71).

Za cijev vrijedi jednadžba (84).

Za sloj vode između cijevi i leda vrijedi jednadžba (86).

Za led na cijevi vrijedi jednadžba:

$$r_{led}\,\frac{dm_{led}}{dt} = \phi_{w,led} + \phi_{lamela,led} - \phi_{led,zrak} - \phi_{w\ lamela,led} \tag{94}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{w\ lamela,led} = \alpha_w * 2\left[\left(d_v + \delta_{led,0}\right)\pi\left(\delta_{led\ lamela,0} - \delta_{led\ lamela}\right)\right]\left(T_{w\ lamela} - T_{led}\right) \tag{95}$$

Vrijednosti $\phi_{w,led}$, $\phi_{lamela,led}$ i $\phi_{led,zrak}$ dobivaju se redom iz jednadžbi (88), (91) i (79).

Za lamelu vrijedi jednadžba:

$$m_{lamela}\,c_{lamela}\,\frac{dT_{lamela}}{dt} = \phi_{cijev,lamela} - \phi_{lamela,led} - \phi_{lamela,w\ lamela} - \phi_{lamela,w} \tag{96}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{lamela,w\ lamela} = \alpha_w * 2\left[ab - \left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2\frac{\pi}{4}\right]\left(T_{lamela} - T_{w\ lamela}\right) \tag{97}$$

Vrijednosti $\phi_{cijev,lamela}$, $\phi_{lamela,led}$ i $\phi_{lamela,w}$ dobivaju se redom iz jednadžbi (75), (91) i (87).

Za sloj vode između lamele i leda na lameli vrijedi jednadžba:

$$m_{w\ lamela}\ c_{w\ lamela}\ \frac{dT_{w\ lamela}}{dt} = \phi_{lamela,w\ lamela} - \phi_{w\ lamela,led\ lamela} - \phi_{w\ lamela,led} \quad (98)$$

Pri čemu je :

$$\phi_{w\ lamela,led\ lamela} = \alpha_w * 2\left[ab - \left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 \frac{\pi}{4}\right] (T_{w\ lamela} - T_{led\ lamela}) \quad (99)$$

Vrijednosti $\phi_{lamela,w\ lamela}$ i $\phi_{w\ lamela,led}$ dobivaju se iz jednadžbi (97) i (95).

Za led na lameli vrijedi jednadžba:

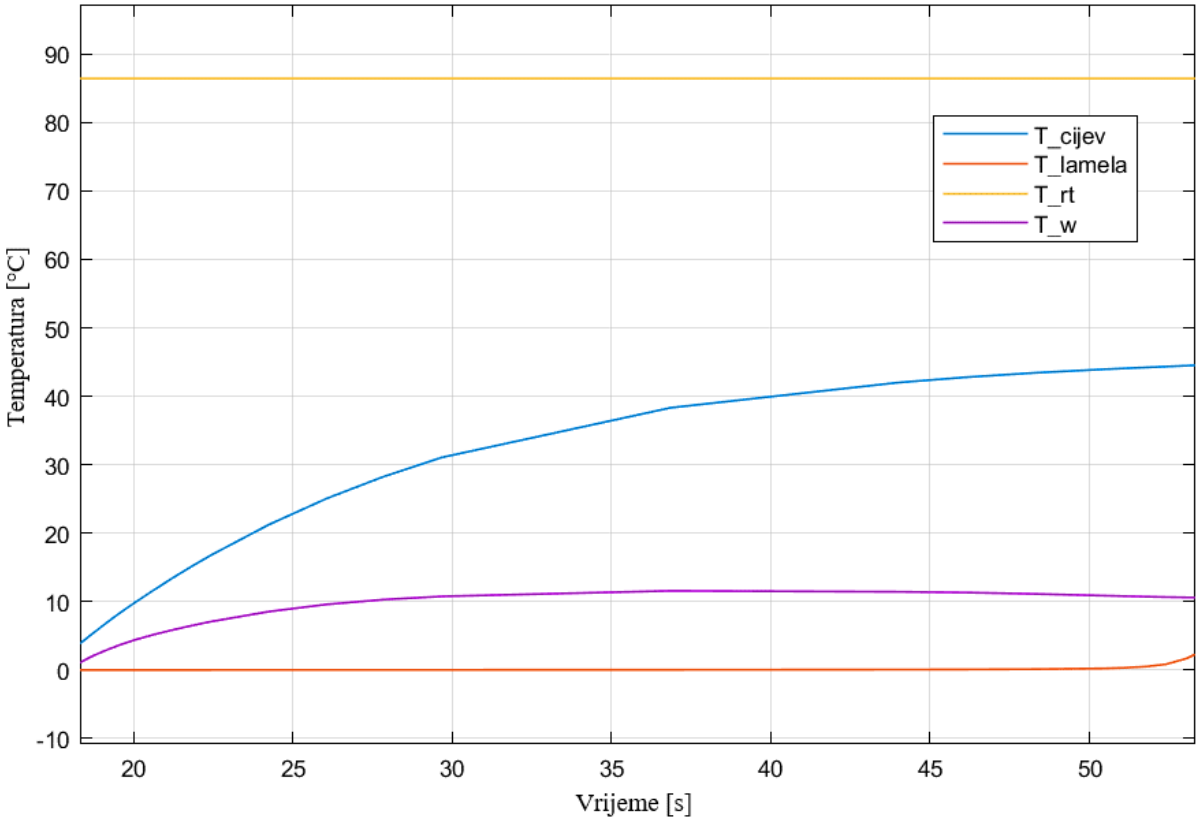
$$r_{led}\ \frac{dm_{led\ lamela}}{dt} = \phi_{w\ lamela,led\ lamela} - \phi_{led\ lamela,zrak} \quad (100)$$

Pri čemu je:

$$\frac{dm_{led\ lamela}}{dt} = \rho_{led} * 2\left[ab - \left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 \frac{\pi}{4}\right] \frac{d\delta_{led\ lamela}}{dt} \quad (101)$$

Vrijednosti $\phi_{w\ lamela,led\ lamela}$ i $\phi_{led\ lamela,zrak}$ dobivaju se iz jednadžbi (99) i (83).

Navedene jednadžbe opisuju fazu odleđivanja cijevi i lamele. Slika 30 prikazuje kretanje temperatura pojedinih komponenata tijekom faze odleđivanja cijevi i lamele, za element na ulazu u isparivač.



Slika 30 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja cijevi i lamele

Tijekom trajanja faze odleđivanja cijevi i lamele raste temperatura cijevi i temperatura vodenog sloja između cijevi i leda. Temperatura lamele ponovno se neznatno povećava zbog malog toplinskog toka s cijevi na lamelu i velike toplinske vodljivosti materijala lamele, što za posljedicu ima brzi prijenos energije na led na lameli. Na kraju faze dolazi do potpunog otapanja leda na cijevi i počinje faza otapanja leda na lameli.

6.2.4. Faza 4 – odleđivanje lamele

Odleđivanje lamele počinje nakon potpunog otapanja sloja leda na cijevi. Nakon otapanja leda na cijevi dolazi do promjene fizikalnog opisa modela. Naime, nakon što se led na cijevi otopi, sloj vode na cijevi i sloj vode na lameli isteku prema odvodu kondenzata i cijev, lamela i sloj leda na lameli dolaze u kontakt sa zrakom u komori. Zrak koji se nalazi u prostoru između lamela u sklopu modela je definiran kao „zarobljeni“ zrak kojemu cijev i lamela predaju topline, a koji potom predaje toplinu ledu, na taj način smanjujući njegovu debljinu. Navedena faza ugrađena je u model po uzoru na [6].

Jednadžbe koje opisuju fazu odleđivanja lamele navedene su u nastavku.

Za radnu tvar vrijedi jednadžba (71).

Za cijev vrijedi jednadžba:

$$m_{cijev}\, c_{cijev}\, \frac{dT_{cijev}}{dt} = \phi_{RT,cijev} - \phi_{cijev,lamela} - \phi_{cijev,z_{zrak}} \tag{102}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{cijev,z_zrak} = \alpha_v\, d_v\, \pi(L - \delta_{lamela})\left(T_{cijev} - T_{z_zrak}\right) \tag{103}$$

Vrijednosti $\phi_{RT,cijev}$ i $\phi_{cijev,lamela}$ dobivaju se iz jednadžbi (73) i (75).

Za lamelu vrijedi jednadžba:

$$m_{lamela}\, c_{lamela}\, \frac{dT_{lamela}}{dt} = \phi_{cijev,lamela} - \phi_{lamela,z_{zrak}} \tag{104}$$

$$\phi_{lamela,z_zrak} = \alpha_v * 2\left[ab - {d_v}^2 \frac{\pi}{4}\right]\left(T_{lamela} - T_{z_{zrak}}\right) \tag{105}$$

Vrijednost $\phi_{cijev,lamela}$ dobiva se iz izraza (75).

Za „zatočeni“ zrak vrijedi izraz:

$$m_{z_zrak}\, c_{zrak}\, \frac{dT_{z_zrak}}{dt} = \phi_{lamela,z_zrak} + \phi_{cijev,z_zrak} - \phi_{z_{zrak},led\ lamela} \tag{106}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{z_zrak,led\ lamela} = \alpha_v * 4\left[ab - \left(d_v + 2\delta_{led,0}\right)^2 \frac{\pi}{4}\right] \left(T_{z_{zrak}} - T_{led\ lamela}\right) \qquad (107)$$

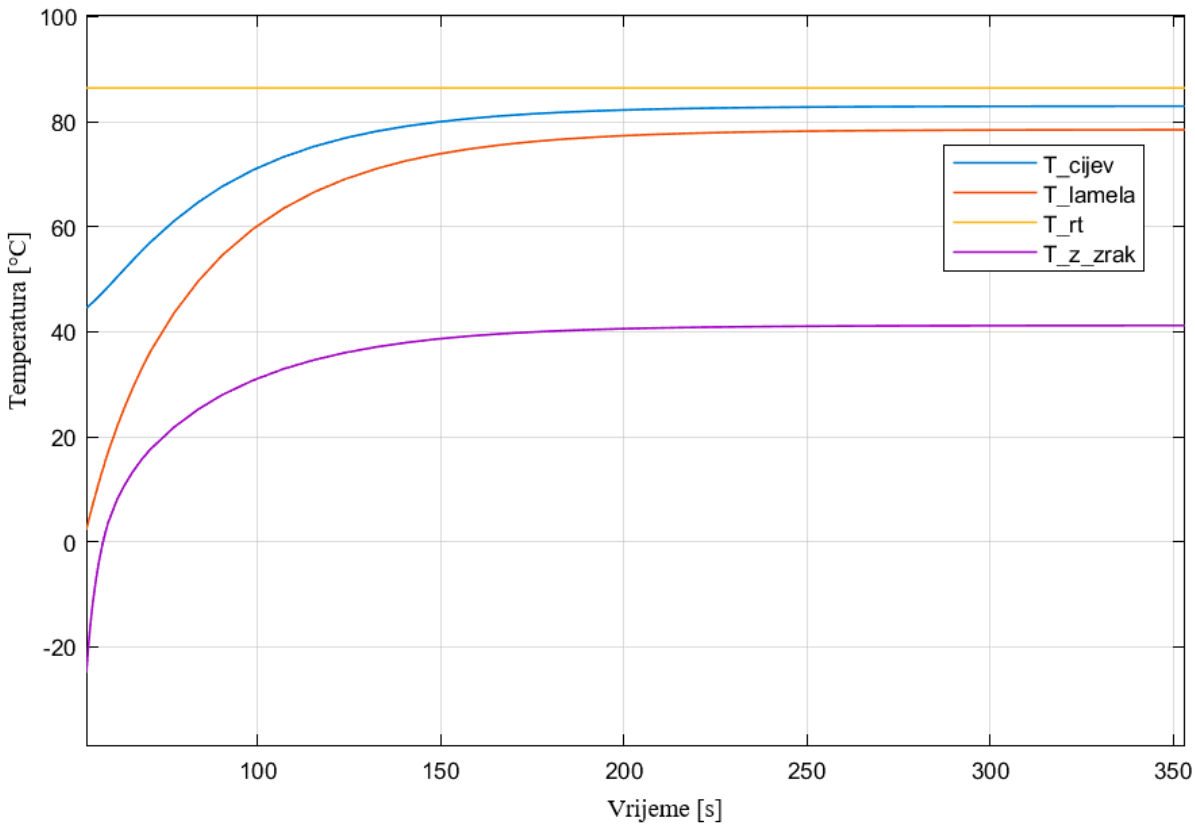
Vrijednosti ϕ_{lamela,z_zrak} i ϕ_{cijev,z_zrak} dobivaju se iz izraza (105) i (103).

Za led na lameli vrijedi izraz:

$$r_{led} \frac{dm_{led\ lamela}}{dt} = \phi_{z_zrak,led\ lamela} \qquad (108)$$

Vrijednosti $\frac{dm_{led\ lamela}}{dt}$ i $\phi_{z_zrak,led\ lamela}$ dobivaju se iz izraza (101) i (107).

Navedene jednadžbe opisuju fazu odleđivanja lamele. Slika 31 prikazuje kretanje temperatura pojedinih komponenata tijekom faze odleđivanja lamele, za element na ulazu u isparivač.



Slika 31 Kretanje temperatura tijekom faze odleđivanja lamele

Završetkom odleđivanja leda na cijevi i uklanjanjem sloja vode u kontaktu s cijevi i lamelom dolazi do naglog porasta temperature. Porast temperature posljedica je otežane predaje toplinskog toka s cijevi i lamele uslijed naglog smanjenja koeficijenta prijelaza topline. Nakon približno 2 minute zrak između lamela se zagrije i uspostavlja se stacionarno stanje sve dok se

led na lameli u potpunosti ne odledi. Nakon završetka odleđivanja lamele počinje faza suhog grijanja.

6.2.5. Faza 5 – suho grijanje

Suho grijanje završna je faza odleđivanja isparivača koja počinje nakon potpunog otapanja leda na cijevi i lameli. Po završetku procesa otapanja isparivača na određenoj udaljenosti od ulaska vrućih para u izmjenjivač, odgovarajući element se nastavlja zagrijavati i predavati toplinu na zrak u komori sve dok se cijeli isparivač ne odledi, odnosno ne završi proces odleđivanja. Obzirom da pri odleđivanju isparivača, kroz dijelove cjevovoda udaljenije od ulaza u isparivač struji mokra para temperature 35°C odleđivanje u tim dijelovima isparivača traje duže u odnosu na ulaz u isparivač. Sva toplina predana zraku nakon završetka odleđivanja na određenoj duljini u cjevovodu može se stoga smatrati parazitskom toplinom koja povećava temperaturu zraka u komori, što je nepogodno sa stajališta učinkovitosti sustava hlađenja.

Jednadžbe koje opisuju postupak suhog grijanja navedene su u nastavku.

Za radnu tvar vrijedi jednadžba (71).

Za cijev vrijedi jednadžba:

$$m_{cijev}\, c_{cijev}\, \frac{dT_{cijev}}{dt} = \phi_{RT,cijev} - \phi_{cijev,lamela} - \phi_{cijev,zrak} \tag{109}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{cijev,zrak} = \alpha_v\, d_v\, \pi(L - \delta_{lamela})\left(T_{cijev} - T_{zrak}\right) \tag{110}$$

Vrijednosti $\phi_{RT,cijev}$ i $\phi_{cijev,lamela}$ dobivaju se iz jednadžbi (73) i (75).

Za lamelu vrijedi jednadžba:

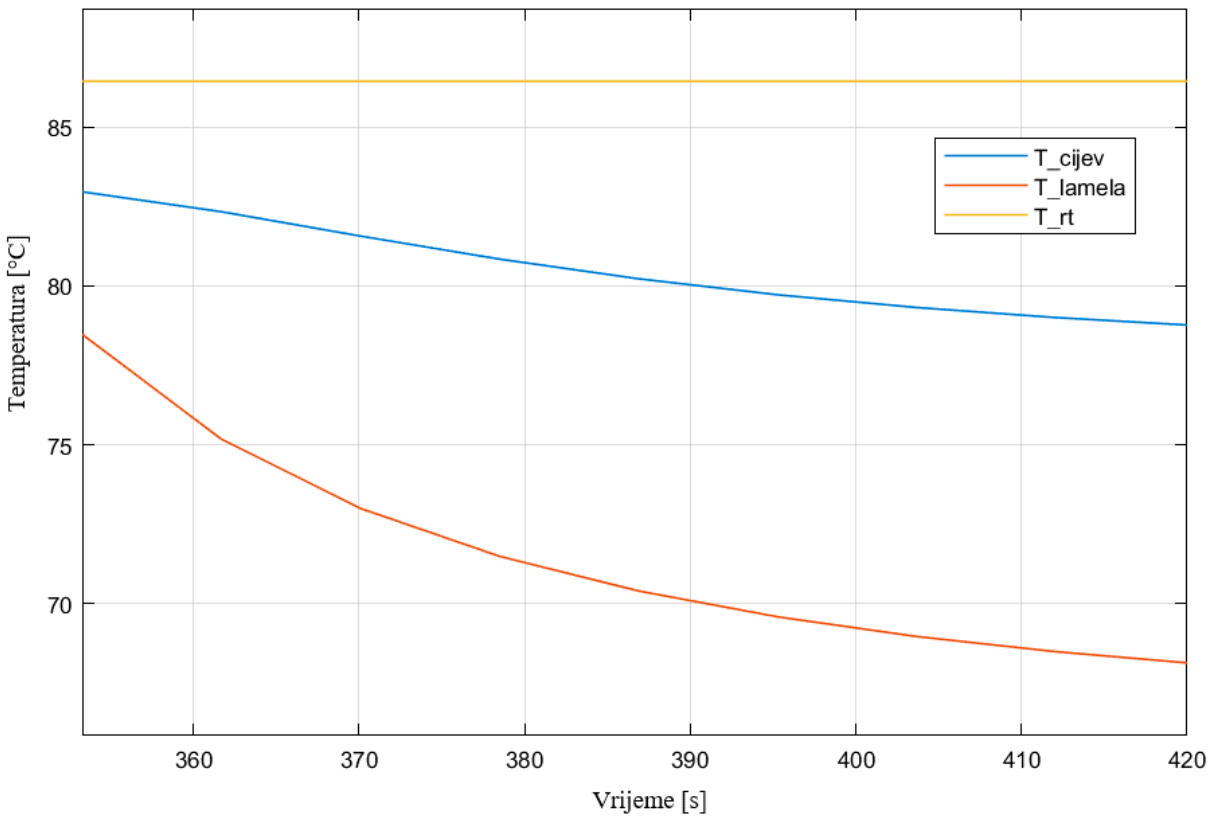
$$m_{lamela}\, c_{lamela}\, \frac{dT_{lamela}}{dt} = \phi_{cijev,lamela} - \phi_{lamela,zrak} \tag{111}$$

Pri čemu je:

$$\phi_{lamela,zrak} = \alpha_v * 2\left[ab - {d_v}^2 \frac{\pi}{4}\right] (T_{lamela} - T_{zrak}) \tag{112}$$

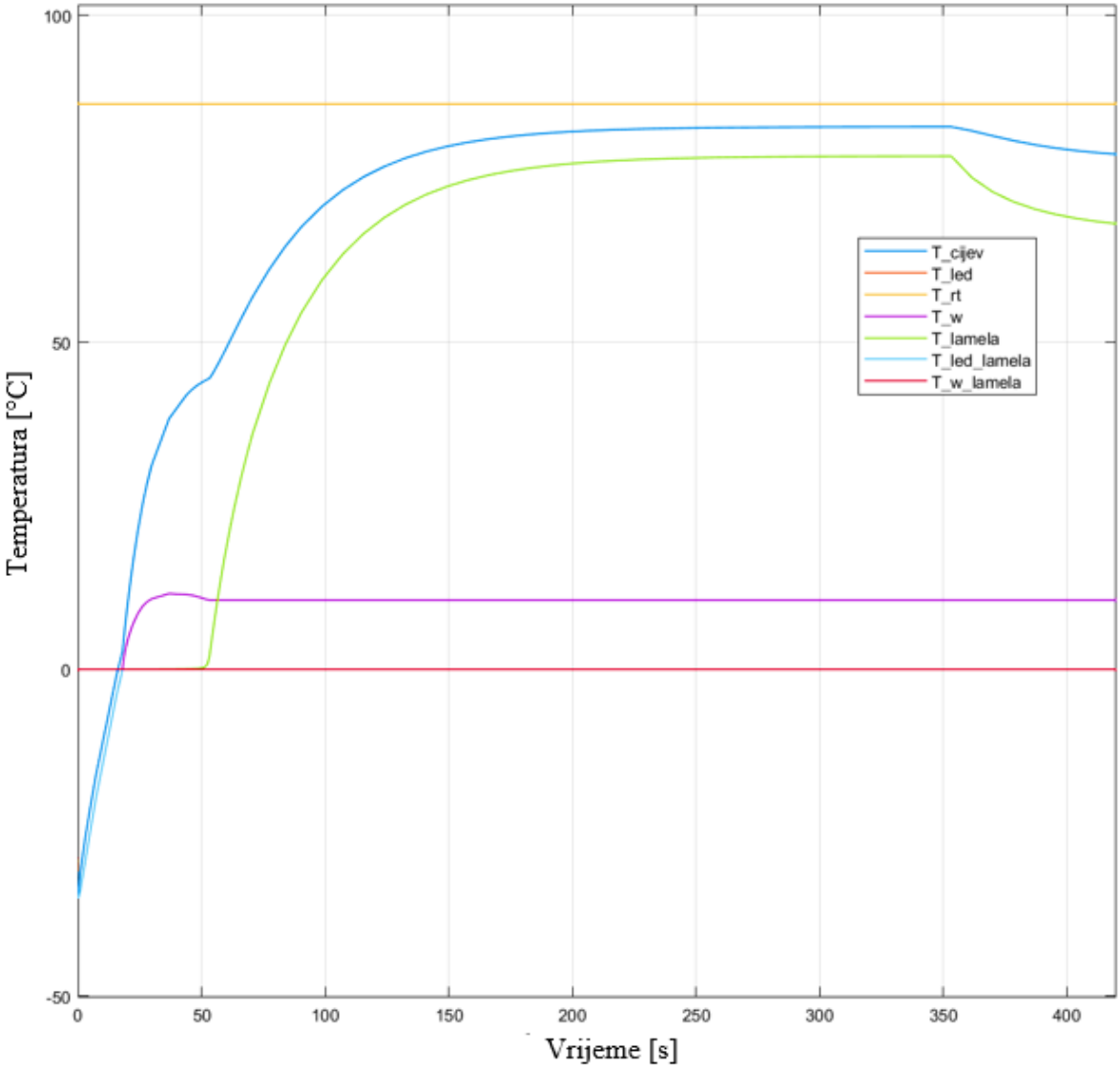
Vrijednost $\phi_{cijev,lamela}$ dobiva se iz jednadžbe (75).

Navedene jednadžbe opisuju fazu suhog grijanja. Slika 32 prikazuje kretanje temperatura pojedinih komponenata tijekom faze suhog grijanja, za element na ulazu u isparivač.



Slika 32 Kretanje temperatura tijekom faze suhog grijanja

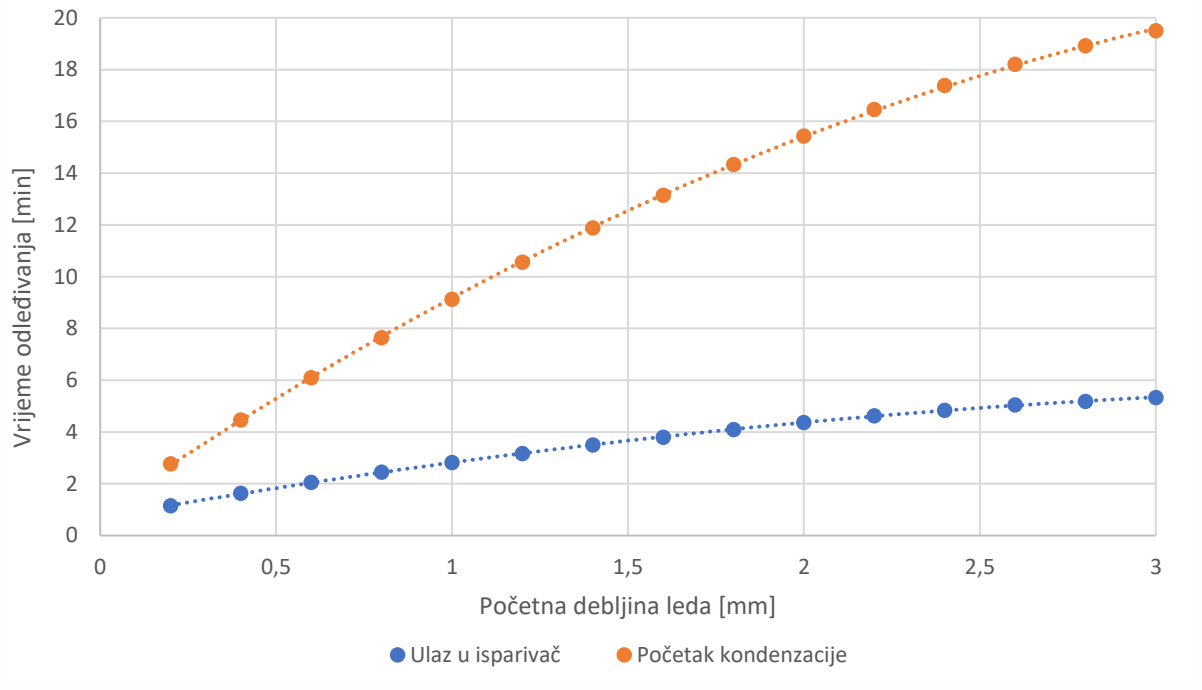
Po završetku odleđivanja, temperatura cijevi i lamela pada, budući da je u model ugrađena temperatura zraka -25°C pri fazi suhog grijanja, u odnosu na višu temperaturu zraka u prethodnoj fazi. Model suhog grijanja daje stoga veće dobitke topline na zrak u komori u odnosu na stvaran iznos koji je smanjen uslijed povišenja temperature zraka u kontaktu s izmjenjivačkim površinama cijevi i lamela.



Slika 33 Kretanje temperatura tijekom cijelog procesa odleđivanja

Slika 33 prikazuje kako se mijenjaju temperature svih pojedinih komponenata tijekom različitih faza u odleđivanju isparivača.

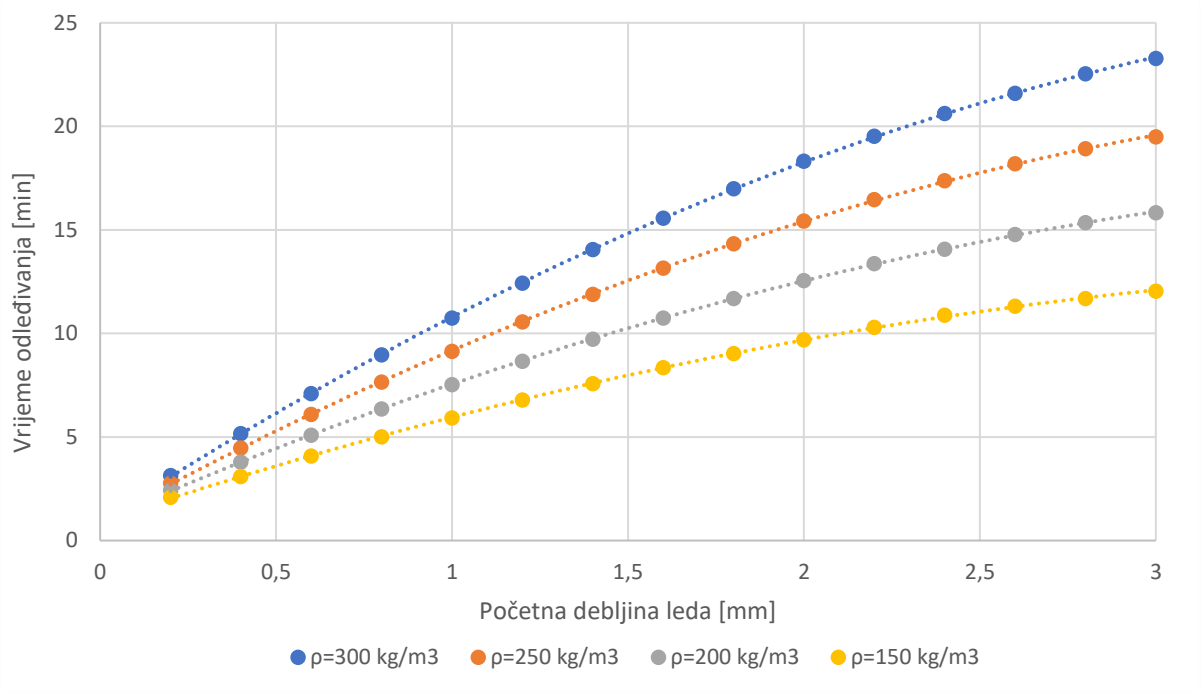
Na slici 34 prikazano je vrijeme odleđivanja isparivača u ovisnosti o početnoj debljini leda. Trajanje odleđivanja prikazano je za element cijevi na ulazu u isparivač kroz koji struje pregrijane pare radne tvari visoke temperature i element cijevi na određenoj udaljenosti od ulaza u isparivač kroz kojega struji radna tvar temperature kondenzacije.



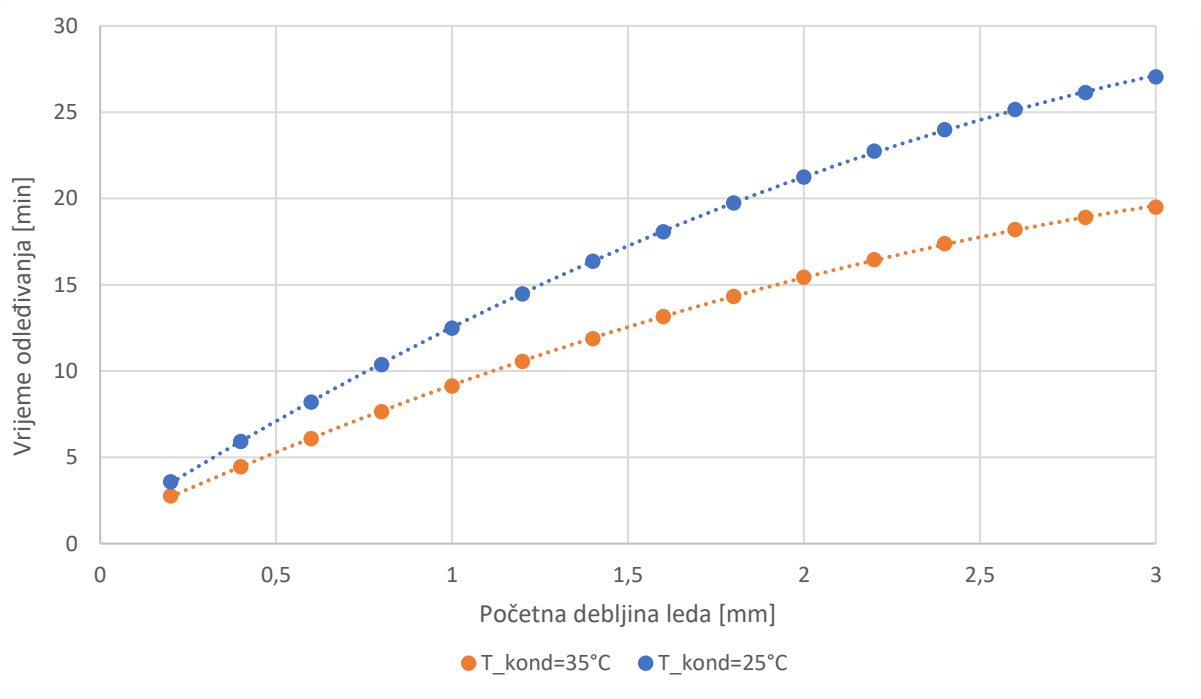
Slika 34 Vrijeme odleđivanja elementa u ovisnosti o početnoj debljini leda

Iz slike 34 jasno je kako odleđivanje dijela isparivača u kojemu se odvija kondenzacija radne tvari traje znatno duže u odnosu na odleđivanje dijela isparivača gdje ulazi pregrijana para. Razlika vremena odleđivanja na spomenutim dijelovima direktno je povezana s vremenom trajanja suhog grijanja na ulazu u isparivač. Velika razlika vremena odleđivanja pri višim debljinama leda uzrokuje dugo trajanje faze suhog grijanja tijekom koje se zagrijava zrak u prostoru komore. Redovitim odleđivanjem isparivača smanjuje se početna debljina leda i parazitski toplinski dobici.

Slika 35 prikazuje ovisnost vremena odleđivanja isparivača o gustoći leda. Kako je objašnjeno u poglavlju 4, ovisno o uvjetima u komori na isparivaču se formira led različite gustoće. Relativna vlažnost, uvjeti strujanja, te količina akumulirane mase leda uvjetuju gustoću leda na isparivaču. Kako pokazuje slika 35, za veće vrijednosti gustoće leda potrebno je više vremena za odleđivanje isparivača budući da je i ukupna masa leda veća u tom slučaju.



Slika 35 Ovisnost vremena odleđivanja o gustoći leda



Slika 36 Ovisnost vremena odleđivanja o temperaturi kondenzacije

Odleđivanje isparivača provodi se pomoću pregrijanih para radne tvari. Temperatura pregrijanih para na ulazu u isparivač ovisi o trenutnoj temperaturi kondenzacije radne tvari.

Uvođenjem varijabilne temperature kondenzacije, temperatura radne tvari kojom se odleđuju isparivači biti će smanjena tijekom većeg dijela godine. Obzirom na smanjenu temperaturu kondenzacije, za odleđivanje isparivača biti će potrebno više vremena kako prikazuje slika 36.

7. Regulacija procesa odleđivanja isparivača

7.1. Učinkovitost isparivača

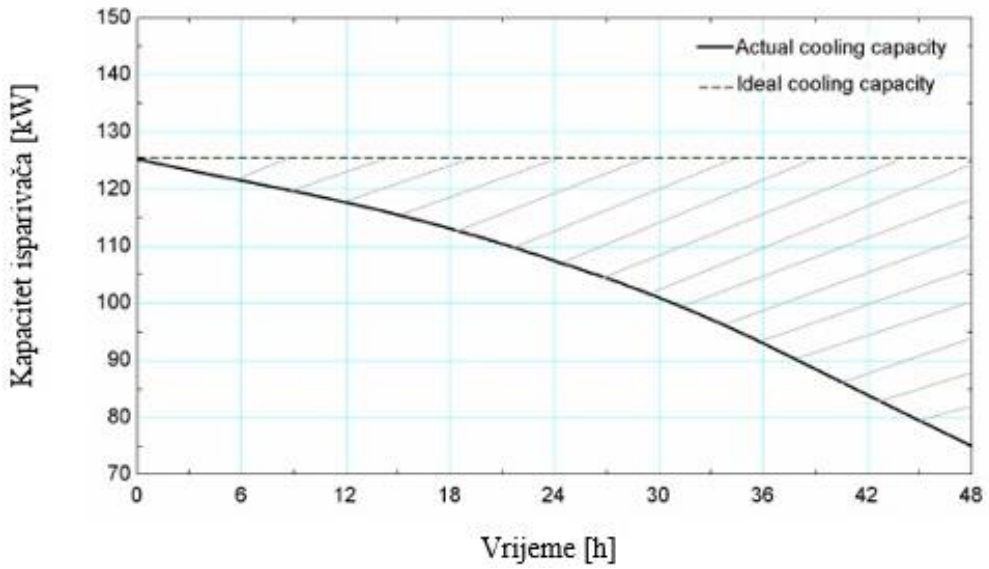
Odleđivanje isparivača provodi se s ciljem povećanja učinkovitosti rashladnog procesa. Kako bi se postigla maksimalna učinkovitost sustava hlađenja potrebno je regulirati vremenski interval između dva odleđivanja i trajanje samog postupka odleđivanja.

Analiza toplinskih gubitaka rashladnog procesa i gubitaka uzrokovanih odleđivanjem isparivača iz [12] dana je u nastavku.

Smanjenje kapaciteta isparivača zbog pojave naslaga leda na izmjenjivačkim površinama opisano je izrazom:

$$Q_{drop} = \left(\phi_{ideal} \times t_{cooling}\right) - \int_0^{t_{cooling}} \phi_{act}\, dt \tag{113}$$

gdje je navedeni gubitak definiran kao razlika između maksimalnog rashladnog učina, koji bi isparivač predao zraku kada bi cijelo vrijeme radio s nazivnim kapacitetom, odnosno ne bi dolazilo do formiranja naslaga leda, i stvarnog predanog rashladnog učina. Šrafirana površina na slici 37 grafički prikazuje navedeni gubitak.



Slika 37 Gubitak zbog pada kapaciteta isparivača [12]

Iz slike 37 se može zaključiti kako gubitak zbog pada kapaciteta raste progresivno s vremenom, te postaje dominantan gubitak kako se povećava vrijeme između dva odleđivanja isparivača.

Gubitak energije tijekom odleđivanja isparivača može se podijeliti u tri dijela, prema tri faze odleđivanja definirane u [12].

Prvi gubitak nastaje tijekom tkz. „pump-out“ faze u kojoj se iz isparivača uklanja zaostala kapljevina radne tvari. U navedenoj fazi ventilatori i dalje pušu zraka preko izmjenjivačkih površina i radna tvar predaje toplinu zraku sa smanjenjem toplinskog toka kako se zaostala radna tvar odvodi u separator. Gubitak „pump-out“ faze opisan je jednadžbom:

$$Q_{pump-out} = \left(\phi_{ideal} \times t_{pump}\right) - \int_0^{t_{pump}} \phi_{act}\, dt \tag{114}$$

Tijekom odleđivanja isparivača, jasno je kako isparivač ne predaje rashladnu energiju zraku u komori. Uzme li se u obzir vrijeme trajanja odleđivanja i pomnoži s nazivnim kapacitetom isparivača dobiva se gubitak prestanka rada isparivača, opisan izrazom:

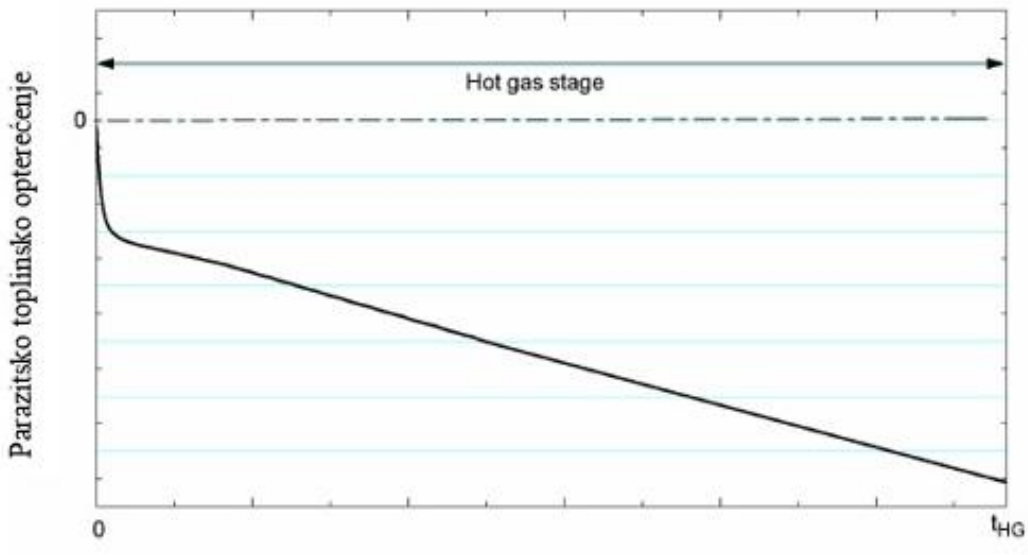
$$Q_{no-cooling} = \phi_{ideal} \times \left(t_{HG} + t_{decomp}\right) \tag{115}$$

gdje je t_{HG} vrijeme dotoka pregrijanih para u isparivač, a t_{decomp}vrijeme dekompresije isparivača.

Osim prestanka rada, isparivač zbog dotoka pregrijanih para radne tvari predaje toplinu u komoru, koja predstavlja tkz. parazitsko toplinsko opterećenje. Parazitsko toplinsko opterećenje razlika je ukupne topline koju pregrijane pare predaju isparivaču i topline koja se troši na otapanje naslaga leda. Jednadžba koja opisuje parazitsko toplinsko opterećenje glasi:

$$Q_{PHL} = \int_0^{t_{HG}} (\phi_{HG} - \phi_{melting})\, dt \tag{116}$$

Slika 38 prikazuje porast parazitskog toplinskog opterećenja s vremenom odleđivanja isparivača. Zbog navedenog dodatnog opterećenja na sustav hlađenja potrebno je izbjegavati prekomjerno trajanje odleđivanja.



Slika 38 Parazitsko toplinsko opterećenje tijekom odleđivanja isparivača [12]

Ukupni gubitak tijekom jednog ciklusa rada sustava, koji uključuje rad isparivača i odleđivanje, zbroj je prethodno navedenih gubitaka.

$$Q_{losses} = Q_{drop} + Q_{pump-out} + Q_{no-cooling} + Q_{PHL} \tag{117}$$

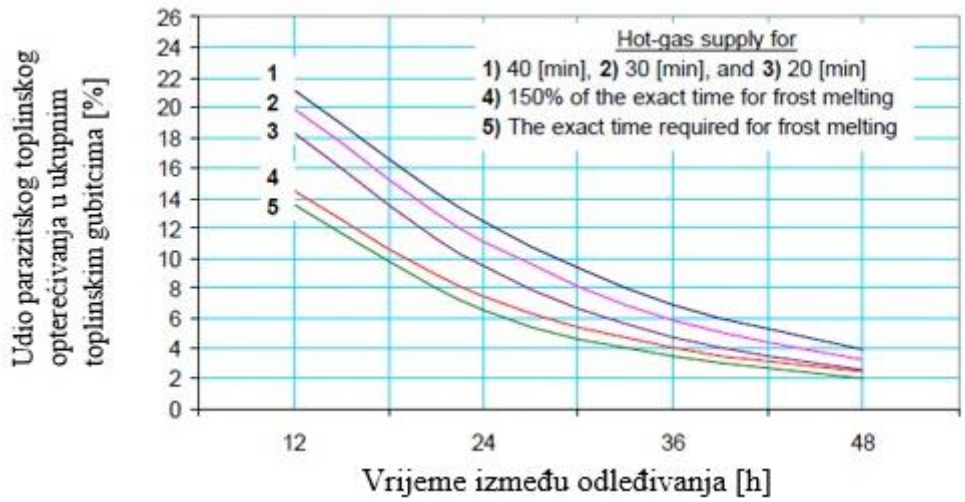
Učinkovitost isparivača definirana je kao omjer stvarnog predanog rashladnog učina i idealnog toplinskog učina tijekom jednog ciklusa.

$$\eta_{sys} = \frac{\phi_{ideal} \times \left(t_{cooling} + t_{pump} + t_{HG} + t_{decomp}\right) - Q_{losses}}{\phi_{ideal} \times \left(t_{cooling} + t_{pump} + t_{HG} + t_{decomp}\right)} \tag{118}$$

Regulacija rada isparivača provodi se s ciljem optimizacije ukupne učinkovitosti sustava.

7.2. Regulacijski sustavi

Najjednostavnija metoda regulacije odleđivanja isparivača je preko predefiniranog vremena odleđivanja. Iskustveno se odredi trajanje i razmak između dva odleđivanja isparivača te se postupak periodički ponavlja. Navedeni način regulacije procesa zasigurno nije optimalno rješenje zbog mogućnosti predugog trajanja odleđivanja isparivača koje povećava parazitsko toplinsko opterećenje. Slika 39 prikazuje kako se povećava udio parazitskog toplinskog opterećenja u ukupnim toplinskim gubicima s povećanjem trajanja odleđivanja.



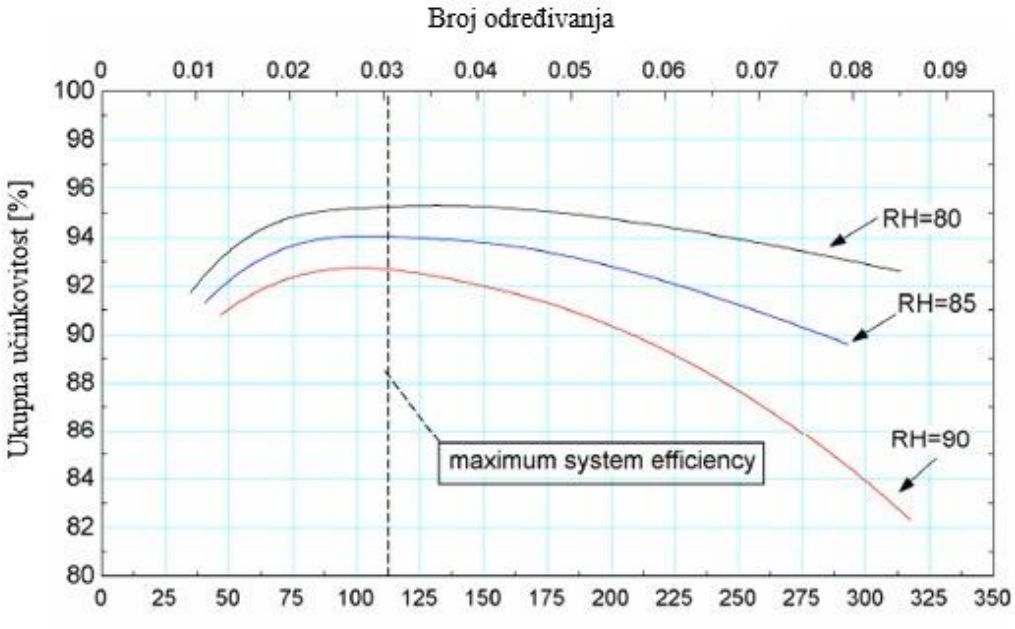
Slika 39 Udio parazitskog toplinskog opterećenja u ukupnim toplinskim gubicima u ovisnosti o trajanju odleđivanja [12]

Nadogradnja regulacije s predefiniranim vremenom odleđivanja predstavljena je u [12]. Ukupna učinkovitost sustava definirana jednadžbom (118) dana je kao funkcija bezdimenzijske značajke – „Defrost number“, odnosno Broja odleđivanja, opisanog jednadžbom:

$$Broj\ odleđivanja = \frac{V_{water}}{A_{min}L_d} \tag{119}$$

gdje V_{water}, volumen vode dobiven odleđivanjem, L_d duljina isparivača u smjeru strujanja zraka, a A_{min} površina poprečnog presjeka strujanja zraka.

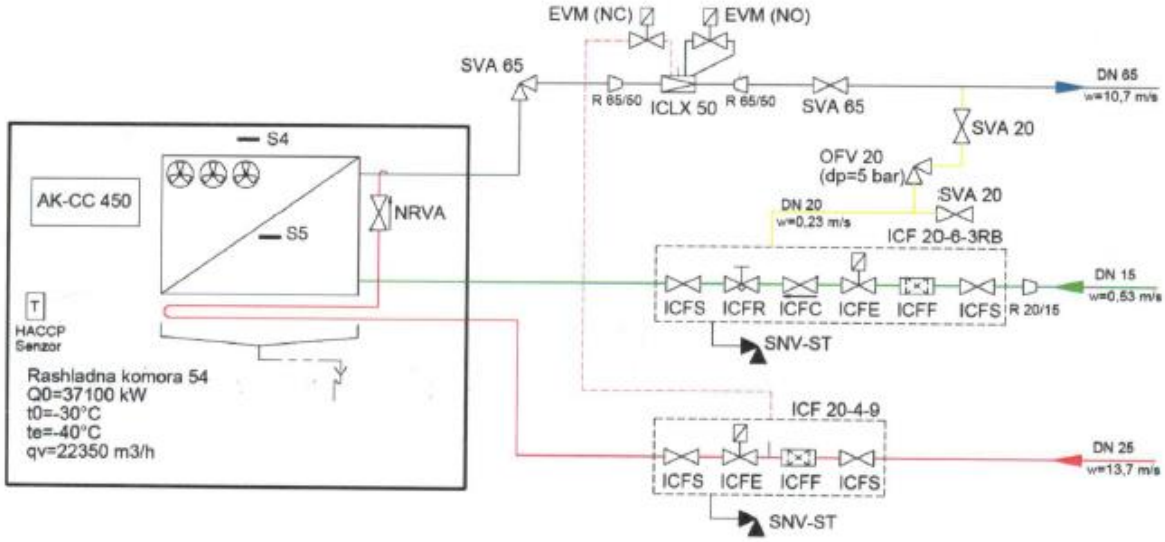
Ovisnost ukupne učinkovitosti o Broju odleđivanja prikazana je na slici 40 za tri različite vrijednosti relativne vlažnosti ulaznog zraka. Rezultati iz [12] pokazuju kako se maksimum ukupne učinkovitosti postiže za određenu vrijednosti Broja odleđivanja neovisno o relativnoj vlažnosti zraka, odnosno brzini akumulacije leda u isparivaču. Za isparivač analiziran u [12], maksimalna učinkovitost postiže se pri Broju odleđivanja 0,03.



Slika 40 Ovisnost ukupne učinkovitosti o Broju odleđivanja [12]

Ugrađivanjem protokomjera na odvodu kondenzata isparivača moguće je mjeriti volumen vode iz jednadžbe (119). Uz pretpostavku približno linearnog povećanja ukupne akumulirane mase leda u isparivaču kako pokazuje [12] i [13] , iterativnim se postupkom može lako odrediti vrijeme između dva odleđivanja isparivača. Trajanje procesa odleđivanja moguće je voditi na način da se odleđivanje prekida kada protok vode mjeren protokomjerom padne ispod određene minimalne vrijednosti. Opisana regulacija procesa odleđivanja može se koristiti i kao kontrolna metoda u slučaju da se regulacija vodi prema temperaturi isparivača kako je opisano u nastavku.

Najčešća metoda regulacije odleđivanja isparivača u praksi jest regulacija prema temperaturi isparivača [14]. Temperatura na isparivaču mjeri se pomoću temperaturnih osjetnika kako je prikazano na slici 41. Temperaturni osjetnik HACCP mjeri temperaturu na isparivaču, te kada temperatura isparivača padne ispod definirane vrijednosti pokreće postupak odleđivanja kako je opisano u poglavlju 5. Nakon što se otopi led na isparivaču i temperatura poraste iznad određene vrijednosti, osjetnik šalje signal regulatoru AK-CC 450 i prekida se dotok pregrijane pare u isparivač, te započinje faza dekompresije isparivača.



Slika 41 Shema regulacije sustava odleđivanja isparivača [4]

Smještaj temperaturnog osjetnika izrazito je važan za ispravnu regulaciju procesa odleđivanja. Obzirom da su različiti isparivači izloženi različitim uvjetima u pogledu relativne vlažnosti zraka potrebno je odabrati kritičan isparivač u smislu najveće debljine leda prema kojemu će se voditi proces odleđivanja, u slučaju da se odleđivanje više isparivača provodi istovremeno. Isto tako debljina leda nije uniformna duž cijelog isparivača pa je stoga potrebno temperaturnu sondu smjestiti na mjesto gdje se uoči formiranje najveće debljine leda ili na mjesto koje je proizvođač predvidio za ugradnju osjetnika temperature.

8. Zaključak

Provedena je analiza industrijskog rashladnog sustava s 5000 paletnih mjesta, kapaciteta 3500 tona dubokosmrznutog mesa, smještenog na području grada Vrbovca. Rashladni sustav sastoji se od direktnog sustava s dvostupanjskom kompresijom i dvotemperaturnim hlađenjem na -35°C (tuneli za duboko zamrzavanje) i -25°C (komore za skladištenje) i posrednog sustava s propilen glikolom, režima -2/-7°C. Satni proračun potrošnje električne energije proveden je u *Matlab-u* za konstantnu temperaturu kondenzacije 35°C i varijabilnu temperaturu kondenzacije u ovisnosti o temperaturi vlažnog termometra. Toplinsko opterećenje oba sustava modelirano je na osnovu podataka o ukupnoj potrošnji električne energije pogona za 2021. godinu.

Rezultati proračunu pokazuju kako je korištenjem varijabilne temperature kondenzacije moguće smanjiti temperaturu kondenzacije na 25°C kroz veći dio godine. Smanjenjem temperature kondenzacije povećava se ukupna godišnja efikasnost rashladnog sustava – SEER, s 2,82 na 3,42. Povećanjem efikasnosti sustava smanjuje se godišnja potrošnja električne energije za pogon kompresora s 18.724.851,63 kWh na 15.444.592,43 kWh, što odgovara smanjenju od 17,5%.

Dinamički model odleđivanja isparivača pregrijanim parama radne tvari razvijen je s ciljem određivanja glavnih utjecajnih parametara te njihovog utjecaja na učinkovitost i trajanje odleđivanja. Definiran je element isparivača duljine cijevi 12 mm, što odgovara razmaku između lamela, s pripadajućim dijelom lamele dimenzija 92 x 79 mm, koji opisuje zakonitosti izmjene topline u izmjenjivaču. Model odleđivanja podijeljen je u pet faza: zagrijavanje, odleđivanje cijevi, odleđivanje cijevi i lamele, odleđivanje lamele i suho grijanje.

Rezultati simulacije pokazuju da vrijeme odleđivanja ovisi o temperaturi kondenzacije radne tvari, debljini i svojstvima leda. Vrijeme odleđivanje isparivača pri temperaturi kondenzacije 35°C, debljini leda 3 mm i gustoći leda 250 kg/m^3 iznosi 19,5 minuta, bez faze uklanjanja zaostale kapljevine i dekompresije isparivača. Smanjenjem temperature kondenzacije povećava se vrijeme odleđivanja isparivača, dok povećanje debljine i gustoće leda rezultira dužim trajanje procesa odleđivanja. Gustoća leda na isparivaču ovisi o relativnoj vlažnosti zraka, ukupnoj akumuliranoj masi leda i drugim parametrima, te zbog toga unosi određenu nesigurnost u rezultate simulacije.

Popis literature

[1] Analysis of frost vizualization over a fin and tube heat exchanger by natural convection, Mohammad Amini, Mahmood Yaghoubi & Ahmad R. Pishevar, 2019.

[2] Numerical and Experimental Study of the Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Industrial Evaporator Coils, Nawal Faisal Aljuwayhel, 2006.

[3] Hlađenje i dizalice topline, podloge za predavanja, dr. sc. Vladimir Soldo, dr. sc. Marino Grozdek, 2018.

[4] Odleđivanje isparivača za hlađenje zraka u industrijskim rashladnim sustavima vrućim plinom, Mikolaj Klenkiewcz – Danfoss Poljska

[5] Two Simple and Accurate Approximations for Wet-Bulb Temperature in Moist Conditions, with Forecasting Applications, J Knox, D.S. Nevius, P. Knox, 2017.

[6]Modelling and experimental validation of the hot-gas defrost process of an air-cooled evaporator, J. Alberto Dopazo, Jose´ Fernandez-Seara*, Francisco J. Uhı´a, Rube´n Diz, 2009.

[7] Coolprop, Excel ekstenzija, baza podataka

[8] Termodinamičke tablice, Kuzma Ražnjević, 1975.

[9] Termodinamika I, Antun Galović, 2014.

[10] Termodinamika II, Antun Galović, 2013.

[11] A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, Lee et all, 1997.

[12] Numerical and Experimental Study of the Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Industrial Evaporator Coils, Nawaf Faisal Aljuwayhel, 2006.

[13] Experimental investigation of the performance of industrial evaporator coils operating under frosting conditions, N.F. Aljuwayhel et all, 2008.

[14] Minoru Kinoshita NY, Sasaki, Nishisonogi both of J. Frost detector for refrigerating apparatus - U.S. Patent 4400949. 352,874, 1983.

Prilog 1

```
clc;
clear;

%Toplinsko opterečenje POSREDNOG sustava hlađenja APROKSIMIRANO funkcijom
%vanjske temperature - minimalno opterečenje 50% nazivnog(maksimalnog)

%Toplinsko opterečenje DIREKTNOG sustava hlađenja APROKSIMIRANO funkcijom
%vanjske temperature - minimalno opterečenje 70% nazivnog(maksimalnog)

%PAZI!!! Opterečenje vezano na minimalnu i maksimalnu temperaturu tijekom
%godine -> u slučaju promjene datoteke s podacima vanjske temperature
%funkcija ne vrijedi

%Proračun potrošnje energije rashladnog sustava

A=dlmread('Weather_data_Zagreb_8760_hours.dat',',',0,0);

for i=1:8760
    t_db(i,1)=A(i,1);
    RH(i,1)=A(i,2);
end

t_wb=t_db.*atan(0.151977*(RH+8.313659).^(0.5))+atan(t_db+RH)-atan(RH-
1.676331)+0.00391838*(RH).^(1.5).*atan(0.023101*RH)-4.686035;

for i=1:8760
    t_k(i,1)=t_wb(i,1)+12;
    if t_k(i,1)<25
        t_k(i,1)=25;
    end
    if t_k(i,1)>35
        t_k(i,1)=35;
    end
end

t_k_max=max(t_k);

for i=1:8760
    if (t_k(i,1)>=25)&&(t_k(i,1)<25.25)
        t_k_zaok(i,1)=25;
    end
    if (t_k(i,1)>25.25)&&(t_k(i,1)<25.75)
        t_k_zaok(i,1)=25.5;
    end
    if (t_k(i,1)>25.75)&&(t_k(i,1)<26.25)
        t_k_zaok(i,1)=26;
    end
    if (t_k(i,1)>26.25)&&(t_k(i,1)<26.75)
        t_k_zaok(i,1)=26.5;
    end
    if (t_k(i,1)>26.75)&&(t_k(i,1)<27.25)
        t_k_zaok(i,1)=27;
    end
    if (t_k(i,1)>27.25)&&(t_k(i,1)<27.75)
```

```
        t_k_zaok(i,1)=27.5;
    end
    if (t_k(i,1)>27.75)&&(t_k(i,1)<28.25)
        t_k_zaok(i,1)=28;
    end
    if (t_k(i,1)>28.25)&&(t_k(i,1)<28.75)
        t_k_zaok(i,1)=28.5;
    end
    if (t_k(i,1)>28.75)&&(t_k(i,1)<29.25)
        t_k_zaok(i,1)=29;
    end
    if (t_k(i,1)>29.25)&&(t_k(i,1)<29.75)
        t_k_zaok(i,1)=29.5;
    end
    if (t_k(i,1)>29.75)&&(t_k(i,1)<30.25)
        t_k_zaok(i,1)=30;
    end
    if (t_k(i,1)>30.25)&&(t_k(i,1)<30.75)
        t_k_zaok(i,1)=30.5;
    end
    if (t_k(i,1)>30.75)&&(t_k(i,1)<31.25)
        t_k_zaok(i,1)=31;
    end
    if (t_k(i,1)>31.25)&&(t_k(i,1)<31.75)
        t_k_zaok(i,1)=31.5;
    end
    if (t_k(i,1)>31.75)&&(t_k(i,1)<32.25)
        t_k_zaok(i,1)=32;
    end
    if (t_k(i,1)>32.25)&&(t_k(i,1)<32.75)
        t_k_zaok(i,1)=32.5;
    end
    if (t_k(i,1)>32.75)&&(t_k(i,1)<33.25)
        t_k_zaok(i,1)=33;
    end
    if (t_k(i,1)>33.25)&&(t_k(i,1)<33.75)
        t_k_zaok(i,1)=33.5;
    end
    if (t_k(i,1)>33.75)&&(t_k(i,1)<34.25)
        t_k_zaok(i,1)=34;
    end
    if (t_k(i,1)>34.25)&&(t_k(i,1)<34.75)
        t_k_zaok(i,1)=34.5;
    end
    if t_k(i,1)>=34.75
        t_k_zaok(i,1)=35;
    end
end

%Entalpije za DIREKTNI rashladni sustav

h=dlmread('Entalpije.dat',';',1,0);

for i=1:8760
    h1(i,1)=h(1,1);
    h2(i,1)=h(2,1);
    h3(i,1)=h(4,1);
    h4(i,1)=h(5,1);
    h5(i,1)=h(7,1);
```

```
h8(i,1)=h(11,1);
h9(i,1)=h(12,1);
h10(i,1)=h(13,1);
if  t_k_zaok(i,1)==25
    h6(i,1)=h(8,1);
    h7(i,1)=h(10,1);
end
if  t_k_zaok(i,1)==25.5
    h6(i,1)=h(8,2);
    h7(i,1)=h(10,2);
end
if  t_k_zaok(i,1)==26
    h6(i,1)=h(8,3);
    h7(i,1)=h(10,3);
end
if  t_k_zaok(i,1)==26.5
    h6(i,1)=h(8,4);
    h7(i,1)=h(10,4);
end
if  t_k_zaok(i,1)==27
    h6(i,1)=h(8,5);
    h7(i,1)=h(10,5);
end
if  t_k_zaok(i,1)==27.5
    h6(i,1)=h(8,6);
    h7(i,1)=h(10,6);
end
if  t_k_zaok(i,1)==28
    h6(i,1)=h(8,7);
    h7(i,1)=h(10,7);
end
if  t_k_zaok(i,1)==28.5
    h6(i,1)=h(8,8);
    h7(i,1)=h(10,8);
end
if  t_k_zaok(i,1)==29
    h6(i,1)=h(8,9);
    h7(i,1)=h(10,9);
end
if  t_k_zaok(i,1)==29.5
    h6(i,1)=h(8,10);
    h7(i,1)=h(10,10);
end
if  t_k_zaok(i,1)==30
    h6(i,1)=h(8,11);
    h7(i,1)=h(10,11);
end
if  t_k_zaok(i,1)==30.5
    h6(i,1)=h(8,12);
    h7(i,1)=h(10,12);
end
if  t_k_zaok(i,1)==31
    h6(i,1)=h(8,13);
    h7(i,1)=h(10,13);
end
if  t_k_zaok(i,1)==31.5
    h6(i,1)=h(8,14);
    h7(i,1)=h(10,14);
end
if  t_k_zaok(i,1)==32
```

```
        h6(i,1)=h(8,15);
        h7(i,1)=h(10,15);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==32.5
        h6(i,1)=h(8,16);
        h7(i,1)=h(10,16);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==33
        h6(i,1)=h(8,17);
        h7(i,1)=h(10,17);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==33.5
        h6(i,1)=h(8,18);
        h7(i,1)=h(10,18);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==34
        h6(i,1)=h(8,19);
        h7(i,1)=h(10,19);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==34.5
        h6(i,1)=h(8,20);
        h7(i,1)=h(10,20);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==35
        h6(i,1)=h(8,21);
        h7(i,1)=h(10,21);
    end
end

%Entalpije za POSREDNI rashladni sustav

h_ch=dlmread('Entalpije_chilleri.dat',';',1,0);

for i=1:8760
    if  t_k_zaok(i,1)==25
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,1);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,1);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,1);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==25.5
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,2);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,2);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,2);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==26
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,3);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,3);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,3);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==26.5
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,4);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,4);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,4);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==27
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,5);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,5);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,5);
    end
```

```
if  t_k_zaok(i,1)==27.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,6);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,6);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,6);
end
if  t_k_zaok(i,1)==28
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,7);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,7);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,7);
end
if  t_k_zaok(i,1)==28.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,8);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,8);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,8);
end
if  t_k_zaok(i,1)==29
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,9);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,9);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,9);
end
if  t_k_zaok(i,1)==29.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,10);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,10);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,10);
end
if  t_k_zaok(i,1)==30
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,11);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,11);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,11);
end
if  t_k_zaok(i,1)==30.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,12);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,12);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,12);
end
if  t_k_zaok(i,1)==31
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,13);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,13);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,13);
end
if  t_k_zaok(i,1)==31.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,14);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,14);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,14);
end
if  t_k_zaok(i,1)==32
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,15);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,15);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,15);
end
if  t_k_zaok(i,1)==32.5
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,16);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,16);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,16);
end
if  t_k_zaok(i,1)==33
    h_ch1(i,1)=h_ch(1,17);
    h_ch2(i,1)=h_ch(2,17);
    h_ch5(i,1)=h_ch(3,17);
end
```

```
    if  t_k_zaok(i,1)==33.5
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,18);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,18);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,18);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==34
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,19);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,19);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,19);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==34.5
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,20);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,20);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,20);
    end
    if  t_k_zaok(i,1)==35
        h_ch1(i,1)=h_ch(1,21);
        h_ch2(i,1)=h_ch(2,21);
        h_ch5(i,1)=h_ch(3,21);
    end
end

Fi_is_1_max=880;%kW
Fi_is_2_max=600;%kW

Fi_is_1=Fi_is_1_max*ones(8760,1).*(0.75+0.25*((t_db+9.85)/(31.2+9.85)));%kW
Fi_is_2=Fi_is_2_max*ones(8760,1).*(0.75+0.25*((t_db+9.85)/(31.2+9.85)));%kW

q_m1=Fi_is_1./(h1-h10);
q_m2=Fi_is_2./(h3-h9);
q_m3=q_m1.*(h2-h8)./(h5-h7)+q_m2.*(h4-h8)./(h5-h7);
P_kom_1=q_m1.*(h2-h1);
P_kom_2=q_m2.*(h4-h3);
P_kom_3=q_m3.*(h6-h5);
P_uk=P_kom_1+P_kom_2+P_kom_3;

Fi_ch_uk=6240*ones(8760,1).*(0.5+0.5*(t_db+9.85)/(31.2+9.85));%kW %
Pretpostavka linearne promjene toplinskog opterečenja u ovisnosti o
vanjskoj temperaturi!!!
%broj chillera 6, svaki chiller 1040kW
q_m_ch=Fi_ch_uk./(h_ch1-h_ch5);
P_kom_ch=q_m_ch.*(h_ch2-h_ch1);

%SEER
Q_rash_is=sum(Fi_is_1+Fi_is_2,1); %kWh
E_elek_is=sum(P_uk,1);
Q_rash_ch=sum(Fi_ch_uk,1);
E_elek_ch=sum(P_kom_ch,1);

SEER=(Q_rash_is+Q_rash_ch)/(E_elek_is+E_elek_ch);

%Razlika potrošnje električne energije u odnosu na konstantnu temperaturu
kondenzacije 35°C

Cijena_struje=0.677;%kn
Trosak_elek_en=(E_elek_is+E_elek_ch)*Cijena_struje;%kn

%Iz Excela:
```

```
P_uk_35=Fi_is_1*0.2574+Fi_is_2*0.1675+Fi_is_1*0.3647+Fi_is_2*0.2949;%kW
P_kom_ch_35=Fi_ch_uk*0.2988;%kW *koeficijent iz vrijednosti entalpije pri
konst temp kondenzacije 35°C !!!
E_elek_is_35=sum(P_uk_35,1); %potrošnja kompresora DIREKTONOG sustava
hlađenja pri temp kondenzacije 35°C
E_elek_ch_35=sum(P_kom_ch_35,1); %potrošnja kompresora POSREDNOG sustava
hlađenja pri temp kondenzacije 35°C
Trosak_elek_en_35=(E_elek_is_35+E_elek_ch_35)*Cijena_struje;

SEER_35=sum(Fi_is_1+Fi_is_2+Fi_ch_uk,1)/(E_elek_is_35+E_elek_ch_35);

Smanjenje_potrosnje=(E_elek_is_35+E_elek_ch_35)-(E_elek_is+E_elek_ch);
Usteda=Trosak_elek_en_35-Trosak_elek_en;
```

Prilog 2

```
%Ulazni podaci u simulaciju odleđivanja

clc;
clear;

m_rt_hl=0.697; %kg/s , ukupni protok radne tvari pri hlađenju
n=10; %broj isparivača u komorama
m_rt=2*m_rt_hl/n; %protok radne tvari kroz isparivač pri odleđivanju

delta_led_0=0.015; %m      PRETPOSTAVKA -> OVISI O UČESTALOSTI ODLEĐIVANJA
delta_led_lamela_0=delta_led_0/5; %m


h_0=1634.10*1000; %J/kg
alfa_u=855.55; %W/m2K    PRORAČUNATO
d_u=0.025; %m
d_v=0.0334; %m
L=0.012; %m
A_cijevi_u=d_u*pi()*L; %m2
A_cijevi_v=d_v*pi()*L; %m2
T_cijevi_0=-35; %°C
lambda_cijevi=52; %W/mK , pocinčani čelik
alfa_v=5.31; %W/m2K     PRORAČUNATO
A_led_v=(d_v+2*delta_led_0)*pi()*L; %m2
T_led_0=-35; %°C
T_zrak=-25; %°C

c_cijevi=461; %J/kgK , pocinčani čelik
c_led=1970; %J/kgK         OVISI O GUSTOĆI LEDA
ro_cijevi=7900; %kg/m3
ro_led=150; %kg/m3        PROVJERITI

delta_lamela=0.0005; %m
m_cijevi=(d_v^2-d_u^2)*pi()/4*L*ro_cijevi; %kg
m_led_0=((d_v+2*delta_led_0)^2-d_v^2)*pi()/4*(L-delta_lamela)*ro_led; %kg

r_led=334000; %J/kg
T_w_0=0; %°C
alfa_w=150; %W/m2K   Aproksimacija
c_w=4186; %J/kgK

a=0.092; %m
b=0.079; %m
A_lamela_0=a*b-d_v^2*pi()/2; %m2
delta_led_lamela_max=0.006; %m
lambda_lamela=229; %W/mK  Aluminij
c_lamela=896; %J/kgK  Aluminij
ro_lamela=2700; %kg/m3  Aluminij
m_led_lamela_0=(a*b-
(d_v+2*delta_led_0)^2*pi()/4)*delta_led_lamela_0*ro_led*2; %kg
m_lamela=delta_lamela*(a*b-d_v^2*pi()/4)*ro_lamela; %kg

lambda_led=0.132+3.13*10^(-4)*ro_led+1.6*10^(-7)*ro_led^2; %W/mK
ro_zrak=1.29; %kg/m^3
```

```
c_zrak=1005; %J/kgK
```