

Posredni sustav hlađenja jabuka u uvjetima kontrolirane atmosfere

Gregorić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:793484>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Gregorić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing.

Student:

Domagoj Gregorić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Vladimiru Soldi koji je prihvatio mentorstvo, pružio podršku i stručne savjete tijekom izrade ovog rada, te što je bio na raspolaganju u svakom trenutku, onda kada je to bilo potrebno.

Domagoj Gregorić



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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj GREGORIĆ** Mat. br.: 0035194217

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Posredni sustav hlađenja jabuka u uvjetima kontrolirane atmosfere**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Indirect Refrigeration System for Apple Storage in Ultra Low Oxygen Atmosphere**

Opis zadatka:

U radu je potrebno projektirati rashladni sustav za potrebe hlađenja prostora za skladištenje 2800 tona jabuka na duži vremenski period u uvjetima kontrolirane atmosfere (ULO hladnjače). Postrojenje je locirano u kontinentalnom dijelu Hrvatske.

Rashladni prostori sastoje se od prijema, sortirnice, manipulativnog hodnika i 23 odvojene ULO hladionice kapaciteta od 50 do 155 tona. Prostore je potrebno sagraditi iz predfabriciranih poliuretanskih panela debljine 120 mm.

Rashladni sustav je indirektna izvedba s radnom tvari R449A u primarnom krugu hlađenja te 30 postotnom mješavinom propilen glikola i vode u sekundarnom krugu. Za hlađenje kondenzatora koristi se okolišni zrak temperature 32 °C. Strojarnica je smještena iznad manipulativnog hodnika na koti +5,2 m.

Rad treba sadržavati:

1. Toplinsko opterećenje rashladnih komora i pomoćnih prostora.
2. Proračun i postavku rashladnog procesa te dimenzioniranje komponenti rashladnog sustava.
3. Izbor opreme za kontrolu atmosfere.
4. Dispozicijski crtež rashladnih komora.
5. Dispozicijski crtež strojarnice.
6. Shemu spajanja i automatske regulacije uređaja.

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

Zadatak zadan:
7. ožujka 2019.

Datum predaje rada:
9. svibnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
15., 16. i 17. svibnja 2019.

Zadatak zadao:

V Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednica Povjerenstva:

Tj. Jurčević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. KONTROLIRANA ATMOSFERA	2
2.1. Povijest.....	2
2.2. Vrste kontrolirane atmosfere.....	3
2.2.1. Kontrolirana atmosfera s niskim i ultraniskim sadržajem kisika.....	4
2.3. Kontrola procesa	4
2.3.1. Adsorber kisika	6
2.3.2. Adsorber za ugljični dioksid	7
2.4. Radne tvari u sustavu	8
3. JABUKA	9
3.1. Jodno- škrobni test	11
4. PRORAČUN GUBITAKA TOPLINE	14
4.1. Transmisijski gubici hladionice 1	14
4.1.1. Izolacija zidova i stropa hladionice 1	14
4.1.2. Izolacija poda hladionice 1	15
4.1.3. Rezultati	16
Dobiveni rezultati toplinskog toka zbog transmisije u hladionici 1 prikazanu su u tablici 4.....	16
4.2. Toplinsko opterećenje od hlađenih proizvoda	16
4.3. Toplinsko opterećenje od pakiranja	17
4.4. Toplinsko opterećenje zbog disanja robe.....	17
4.5. Toplinsko opterećenje zbog infiltracije zraka.....	18
4.6. Toplinsko opterećenje od rasvjete.....	19
4.7. Toplinsko opterećenje od ljudi.....	19
4.8. Toplinsko opterećenje od viličara	20
4.9. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača	20
4.10. Ukupno toplinsko opterećenje	21
5. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA	25
5.1. Termodinamički proces radne tvari R449a.....	25
5.2. Proračun pločastog isparivača.....	28
5.2.1. Prijelaz topline na strani smjese vode i propilen glikola	30
5.2.2. Prijelaz topline na strani radne tvari R449A.....	32
5.2.3. Provjera pretpostavljenog toplinskog toka.....	35

5.2.4. Potrebna površina za izmjenu topline	35
Površina izmjene topline za odabrani izmjenjivač:	35
Potrebna površina za izmjenu topline:	36
5.3. Proračun kondenzatora	37
5.3.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka	46
5.3.2. Koeficijent prijelaza topline na strani RT (kondenzacija u cijevi)	48
5.3.3. Zona I (para radne tvari ulazi u cijev)	49
5.3.4. Zona III (kapljevina radne tvari ulazi u cijev)	50
5.3.5. Konačne vrijednosti proračuna kondenzatora	51
Ukupna potrebna površina prijelaza topline:	51
5.4. Proračun dimenzija cjevovoda	52
5.4.1. Tlačni vod	52
5.4.2. Usisni vod	52
5.4.3. Kapljevinski vod	53
5.4.4. Dimenzioniranje cjevovoda i pumpe sekundarnog kruga	54
6. SPECIFIKACIJA OPREME	57
7. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA	62
8. ZAKLJUČAK	64
LITERATURA	65
PRILOZI	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema automatske kontrole [3].....	5
Slika 2.	Princip rada membranskog adsorbera kisika	6
Slika 3.	Princip rada adsorpcijskog uređaja [4]	7
Slika 4.	Usporedba COP-a za R449A i R404A	8
Slika 5.	Disanje jabuka	10
Slika 6.	Ovisnost brzine respiracije o temperaturi [7]	10
Slika 7.	Ljestvica intenziteta obojenosti presjeka ploda [16]	12
Slika 8.	Tlocrt rashladnih komora	21
Slika 9.	T,s-dijagram s karakterističnim točkama procesa	26
Slika 10.	Pojednostavljeni prikaz sustava.....	27
Slika 11.	Princip rada pločastog izmjenjivača	28
Slika 12.	T,A-dijagram isparivača	29
Slika 13.	T,A-dijagram isparivača	32
Slika 14.	Kondenzator hlađen zrakom u V izvedbi	37
Slika 15.	Kondenzator hlađen zrakom-parametri	38
Slika 16.	T,L- dijagram kondenzatora	39
Slika 17.	Prikaz radne točke pumpe	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Povijest kontrolirane atmosfere [2]	2
Tablica 2. Granične vrijednosti unutar komore za skladištenje [2].....	3
Tablica 3. Preporučeni uvjeti CA atmosfere [6].....	11
Tablica 4. Transmisijski gubici hladionice 1.....	16
Tablica 5. Broj izmjena zraka u 24h [1].....	18
Tablica 6. Transmisijsko opterećenje komora.....	22
Tablica 7. Opterećenje komora zbog hlađenja robe	22
Tablica 8. Opterećenje komora od pakiranja.....	22
Tablica 9. Opterećenje komora zbog disanja robe	22
Tablica 10. Opterećenje komora zbog infiltracije zraka	23
Tablica 11. Opterećenje komora od rasvjete	23
Tablica 12. Opterećenje komora od elektromotora isparivača.....	23
Tablica 13. Ukupno rashladno opterećenje svih hladionica.....	24
Tablica 14. Točke rashladnog procesa	26
Tablica 15. Proračun koeficijenata prijelaza topline na strani RT	34
Tablica 16. Proračun pada tlaka u cjevovodu	55

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
1	Shema spajanja i regulacije
2	Dispozicijski crtež rashladnih komora
3	Dispozicijski crtež strojarnice

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{e1}	m^2/m	Vanjska površina po 1m izmjenjivača
A_f	m^2/m	Površina lamele
A_{i1}	m^2/m	Unutarnja površina po 1m izmjenjivača
A_{iI}	m^2	Unutarnja potrebna površina za prijenos topline zone I
A_{mt}	m^2/m	Vanjska površina cijevi između lamela
A_{UK1}	m^2	Površina za izmjenu topline projektiranog izmjenjivača
A_{UK2}	m^2	Potrebna površina za izmjenu topline
A_z	m^2	Najmanja površina za strujanje zraka
β	-	Omjer unutarnje i vanjske površine izmjenjivača
B	m	Potrebna širina kondenzatora
c_a	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet zraka
c_{sp}	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare R449A
c_{kap}	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet kapljevine R449A
c_s	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet smjese glikola i vode
d_e	m	Vanjski promjer cijevi
d_{ekv}	m	Ekvivalentan promjer cijevi
d_i	m	Unutarnji promjer cijevi
ϵ_{hl}	-	Faktor hlađenja
f_t	mm	Debljina lamela
H	m	Visina izmjenjivača
i_{in}	-	Broj ulaznih cijevi
i_r	-	Broj redova
i_t	-	Broj cijevi u jednom redu
k_{eI}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na vanjsku površinu
k_{eII}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni II sveden na vanjsku površinu
k_{eIII}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni III sveden na vanjsku površinu
k_{iI}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu
k_{iII}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni II sveden na unutarnju površinu
k_{iIII}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline u zoni III sveden na unutarnju površinu
L	m	Dubina izmjenjivača
L_{1I}	m	Duljina cijevi u jednom redu potrebna za zonu I
L_{ovI}	m	Ukupna duljina cijevi potrebna za zonu I

Nu	-	Nusseltov broj
P_k	kW	Potrebna snaga kompresora
$q_{e,trI}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone I sveden na vanjsku površinu
$q_{e,trII}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone II sveden na vanjsku površinu
$q_{e,trIII}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone III sveden na vanjsku površinu
$q_{i,trI}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone I sveden na unutarnju površinu
$q_{i,trII}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone II sveden na unutarnju površinu
$q_{i,trIII}$	W/m ²	Specifičan toplinski tok zone III sveden na unutarnju površinu
Φ_{sup}	kW	Učin I zone kondenzatora
Φ_{lat}	kW	Učin II zone kondenzatora
Φ_{sub}	kW	Učin III zone kondenzatora
$q_{m,RT}$	kg/s	Maseni protok radne tvari (R449A)
q_{ms}	kg/s	Maseni protok smjese propilen glikola i vode
q_{ma}	kg/s	Maseni protok smjese zraka
q_{va}	kg/s	Volumni protok smjese propilen glikola i vode
Re	-	Reynoldsov broj
s_1	mm	Vertikalni razmak između cijevi
s_2	mm	Horizontalni razmak između cijevi
s_f	mm	Razmak između lamela
w_f	m/s	Nastrujna brzina zraka
w_t	m/s	Brzina strujanja radne tvari u tlačnom vodu
w_u	m/s	Brzina strujanja radne tvari u usisnom vodu
w_k	m/s	Brzina strujanja radne tvari u kapljevinskom vodu
α_s	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline na strani smjese
α_A	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
α_a	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline na strani zraka
α_{ai}	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline sveden na unutrašnju površinu cijevi
δ	mm	Debljina stijenke cijevi
ΔA	%	Postotak predimenzioniranosti isparivača
Δp	Pa	Pad tlaka
$\Delta\theta_{mk}$	°C	Srednja logaritamska temperatura razlika na kondenzatoru
$\Delta\theta_{po}$	°C	Razlika temperature RT na pothlađivaču
$\Delta\theta_{pr}$	°C	Razlika temperature kod pregrijanja RT
$\Delta\theta_{mI}$	°C	Srednja logaritamska temperatura razlika u zoni I

$\Delta\vartheta_{mII}$	°C	Srednja logaritamska temperatura razlika u zoni II
$\Delta\vartheta_{mIII}$	°C	Srednja logaritamska temperatura razlika u zoni III
η_k	Pa s	Dinamička viskoznost kapljevine radne tvari
η_p	Pa s	Dinamička viskoznost suhozasićene pare radne tvari
η_{iz}	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
η_s	Pa s	Dinamička viskoznost smjese vode i glikola
ϑ_1, ϑ_i	°C	Temperatura isparavanja
ϑ_2	°C	Temperatura na izlazu iz kompresora
ϑ_3, ϑ_k	°C	Temperatura kondenzacije
ϑ_5	°C	Temperatura pothlađenja
ϑ_{si}	°C	Temperatura smjese na izlazu iz isparivača
ϑ_{su}	°C	Temperatura smjese na ulazu u isparivač
ϑ_{ok}	°C	Temperatura okolišnjeg zraka
ϑ_m	°C	Srednja temperatura zraka na kondenzatoru
λ_k	W/mK	Toplinska vodljivost kapljevine RT
λ_p	W/mK	Toplinska vodljivost suhozasićene pare RT
λ_a	W/mK	Toplinska vodljivost zraka
λ_s	W/mK	Toplinska vodljivost smjese vode i glikola
ν_k	m ² /s	Kinematička viskoznost kapljevine RT
ν_p	m ² /s	Kinematička viskoznost suhozasićene pare RT
ρ_s	kg/m ³	Gustoća smjese vode i propilen glikola
ρ_{kap}	kg/m ³	Gustoća kapljevine RT pri temperaturi isparavanja
ρ_{sp}	kg/m ³	Gustoća pare RT pri temperaturi isparavanja
ρ_a	kg/m ³	Gustoća zraka
ρ_k	kg/m ³	Gustoća kapljevine RT pri temperaturi kondenzacije
ρ_p	kg/m ³	Gustoća pare RT pri temperaturi kondenzacije
Φ_k	kW	Učin kondenzatora pri projektnim uvjetima
Φ_0	kW	Rashladno opterećenje

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu prikazano je projektiranje rashladnog sustava koji se sastoji od 22 ULO (niskog sadržaja kisika) hladionice za hlađenje jabuka. Razina kisika se održava u granicama od 1,5-2,5% dok se količina ugljičnog dioksida nalazi između 1-3%, ovisno o sorti jabuke. Postrojenje se nalazi u kontinentalnoj Hrvatskoj, a sveukupni kapacitet hladnjače iznosi 2800 tona. Sustav je indirektni s radnom tvari R449A u primarnom krugu i mješavinom propilen glikola i vode u sekundarnom krugu. Temperaturni režim glikolne smjese iznosi -1/-4°C. Prikazan je i proračun toplinskih gubitaka hladionica, termodinamičkog procesa, zrakom hlađenog kondenzatora, pločastog isparivača te cjevovoda radne tvari. Na kraju rada izrađena je i shema spajanja i automatske regulacije te dispozicijski crteži rashladnih komora i strojarne.

Ključne riječi: ULO hladnjače, R449A, posredni sustav hlađenja, termodinamički proračun kondenzatora i isparivača

SUMMARY

This graduate thesis will show the process of designing a cooling system that contains 22 ULO (ultra low oxygen) cold rooms for the storage of apples. Depending on the kind of apple inside the cold rooms, the oxygen level is maintained from 1,5-2,5% while the carbon dioxide levels are between 1-3%. The cooling plant is located in continental Croatia, and the total capacity of cold rooms amounts to 2800 tonnes. It is an indirect exchange system with R449A in the primary circuit and a mixture of propylene glycol and water in the secondary circuit. The chosen temperature regime of the glycol mixture is -1/-4°C. The thesis also contains a cold room heat loss calculation, thermodynamic process calculation, plate heat exchanger calculation, air cooled condenser calculation and refrigerant pipeline calculation. At the end of the thesis there is also a connection diagram, diagram of automatic control and a disposition drawing of the cold rooms.

Key words: ULO cold rooms, R449A, indirect cooling system, thermodynamic calculation of condenser and evaporator

1. UVOD

Kod klasičnog načina skladištenja voća i povrća dovoljno je pod kontrolom držati samo optimalnu temperaturu, međutim, kada postoji zahtjev da se roba skladišti na duže vremensko razdoblje, stvari stoje drugačije. Osim optimalne temperature relativne vlažnosti, za postizanje najboljih rezultata treba kontrolirati kisika ($\%O_2$) i koncentraciju ugljičnog dioksida ($\%CO_2$).

Zbog svojeg kemijskog sastava svježe voće i povrće podložno je različitim promjenama te se u njima i nakon berbe odvijaju metaboličke reakcije. One se dijele na disanje (respiraciju), otpuštanje vlage (transpiraciju) te zrenje, dozrijevanje i starenje (senescenciju). Kombinacija niske koncentracije kisika i povećane koncentracije ugljičnog dioksida u prostoru za skladištenje značajno usporava navedene metaboličke promjene i aktivnosti.

Transpiracija predstavlja veliki problem kod čuvanja voća i povrća kako zbog izravnih promjena (gubitka mase), tako i zbog promjene izgleda, teksture i nutritivnih svojstava.

Jedan od najčešćih i najočitijih pokazatelja kvarenja svježeg voća i povrća su promjene uzrokovane aktivnošću mikroorganizama, prije svega bakterija i plijesni. Radi sprječavanja kvarenja svježeg voća i povrća uzrokovanog mikroorganizmima koriste se različiti konzervansi. Međutim, potrošači sve više traže proizvode koji su konzervirani fizikalnim metodama, pa stoga hlađenje i različiti oblici poboljšanja ove metode nalaze sve značajniju primjenu u čuvanju svježeg voća i povrća.

Respiracijom ili izmjenom kisika gubi se prehrambena vrijednost proizvoda, smanjuje se kvaliteta arome, te se gubi svježina. Produkti izmjene kisika su toplinska energija, ugljikov dioksid, vodena para i određeni aromatični sastojci. Povećanjem intenziteta izmjene kisika, spomenuti procesi su brži, a time se smanjuje vrijeme trajanja proizvoda. Ovaj proces naziva se *disanje ploda*. Disanje ploda događa se u stanicama voća pri čemu se ugljikohidrati razgrađuju, a nastaje ugljični dioksid i voda uz oslobađanje topline.

Na dozrijevanje ploda utječu različiti vanjski i unutarnji čimbenici. Unutarnji čimbenici posljedica su kemijskog sastava voća i povrća te su definirani i specifičnostima pojedinih sorti. Vanjski čimbenici odnose se na temperaturu, vlažnost i sastav zraka te ovise o sorti koja se namjerava skladištiti.

2. KONTROLIRANA ATMOSFERA

2.1. Povijest

Kontrolirana i modificirana atmosfera koristi se u posljednjih sedamdeset do osamdeset godina za skladištenje, transport i pakiranje hrane. Čuvanje jabuka u CA (eng. controled atmosphere) razvijalo se od 1930. godine pa sve do danas su se ovi sustavi usavršavali i poboljšavane su njihove mogućnosti. Prva kontrolirana atmosfera napravljena je u Engleskoj 1929. godine, a danas se više od 10 milijuna tona voća godišnje skladišti u CA u mnogim razvijenim i nerazvijenim zemljama. Vremenom se usavršavala tehnologija, pa je nastalo pakiranje u modificiranoj atmosferi (MAP), transport svježeg voća i povrća u CA i korištenje CA tehnologija za suzbijanje djelovanja insekata. Komercijalni razvoj i primjena modificirane i kontrolirane atmosfere nastao je kao posljedica istraživačkog rada. Komercijalna primjena CA skladištenja koristi se za: jabuke, kruške, kivi, luk i kupus, a može biti korištena za banane, kao i brojno drugo voće i povrće. Detaljniji pregled prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Povijest kontrolirane atmosfere [2]

Godina	Događaj
1929.	Kidd i West u Engleskoj počeli industrijsku primjenu
1929.	napravljena prva hladnjača, kasnije usavršavana od 1932, 1950 godine;
1934.	počelo CA skladištenje voća i povrća u Kanadi;
1935.	počelo CA skladištenje voća i povrća u Južnoj Africi;
1938.	počela primjena CA u Nizozemskoj;
1940.	počelo CA skladištenje voća i povrća u New Yorku;
1950.	počinje ozbiljnija primjena CA načina skladištenja;
1965.	uspostavljena prva LO hladnjača za jabuke sa CA od 2 % O ₂ ;
1970.	kupus, banana i luk počeli se čuvati u CA;
1978.	uspostavljena prva ULO hladnjača sa 1,2 % O ₂ ;
1990.	dolazi do razvoja informacijskih tehnologija, senzora,, generatora dušika i etilena;

2.2. Vrste kontrolirane atmosfere

Tehnologija skladištenja u kontroliranoj atmosferi može se podijeliti na:

- Kontroliranu ventilaciju
- Konvencionalnu kontroliranu atmosferu
- Kontroliranu atmosferu sa niskim (LO) i ultraniskim (ULO) sadržajem kisika
- Dinamičku atmosferu (DCA)
- Mikro kontroliranu atmosferu
- Modificiranu atmosferu
- Hipobaričnu atmosferu i umjetno dozrijevanje

Tehnički napredak u konstrukciji CA komora, kao i inovativna rješenja, rezultirali su boljim upravljanjem zrakom i drugim plinovima koji ulaze ili izlaze iz CA komore tokom skladištenja. Raspoloživost više efikasnije opreme za kontrolu razine O₂ i CO₂ u skladišnoj atmosferi omogućila je implementaciju automatskih sistema za upravljanje i kontrolu procesnih stanja. Tada je postalo jasno da je niži nivo kisika u prednosti, te je počeo napredak fokusiran na održavanju niskog nivoa O₂ dozvoljenog za svježe voće i povrće. Tako se mijenjala i terminologija CA skladištenja pa su se počeli koristiti različiti nazivi za različite režime, kao što je LO (nizak O₂) ili ULO (ultra niski O₂), a kasnije dinamička CA (DCA) ili dinamička kontrola sistema (DCS).

Tablica 2. Granične vrijednosti unutar komore za skladištenje [2]

Metoda/vrsta tehnologije	O ₂ (kPa)	CO ₂ (kPa)	N ₂ (kPa)
Klasično hlađenje (normalna atmosfera)	21	0,03	79
Kontrolirana ventilacija	6-18	3-15	79
Konvencionalna kontrolirana atmosfera (CA)	2-5	2-5	90-92
LO	1,5-2	1-3	95-97
ULO	0,1-2	0,5-2	96,8-98,7
Dinamička kontrola sustava	Manje od 0,8	Manje od 1,5	Manje od 98

Tokom skladištenja u CA plinovi se dodaju ili oduzimaju da bi se stvorila atmosfera drugačija od okolne atmosfere, što u velikoj mjeri zavisi od samog proizvoda koji se skladišti. Obično ovo uključuje redukciju kisika i podizanje koncentracije ugljen-dioksida ili obrnuto. Paralelno se razvijao i koncept modificirane atmosfere, a razlika između kontrolirane i modificirane atmosfere je u razini kontrole. Kontrolirana atmosfera je točnija. Različitost prethodno navedenih vrsta kontrolirane atmosfere prikazana je u tablici 2.

2.2.1. Kontrolirana atmosfera s niskim i ultraniskim sadržajem kisika

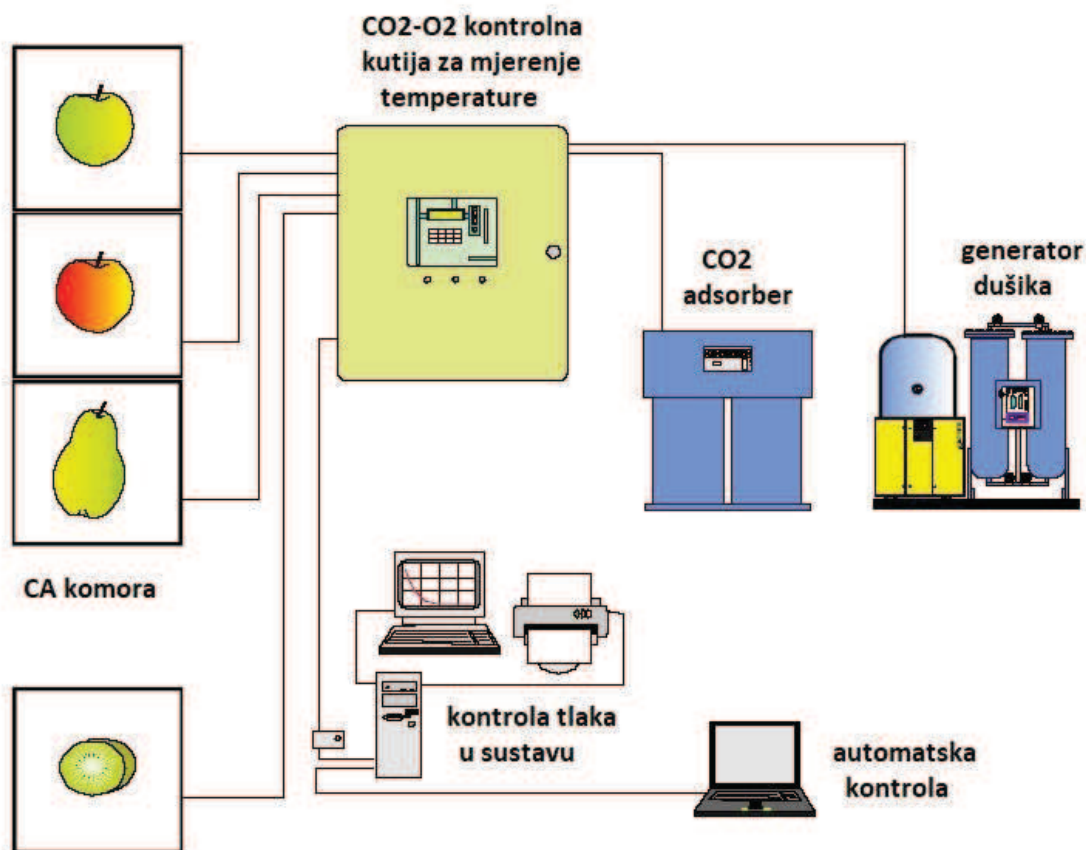
Najniži sadržaj kisika za CA skladištenje na duži period ne treba biti manji od 2% (2 kPa). Međutim, istraživanja rađena u periodu od 1965. godine pokazala su da se jabuke bolje čuvaju u atmosferi koja sadrži od 1 do 1,25 % kisika. Tako se počeo koristiti termin LO (1,5-2 % kisika), a ako se koristi CA sa sadržajem 0,8 do 1,25 % onda se taj tip atmosfere naziva ULO. Ova dva tipa CA počela su se koristiti širom svijeta, za različito voće (jabuke, kruške, kivi, nektarine). Ovakve komore zahtijevaju ekstremne uvjete brtvljenja. Dodatno postavljeni zahtjevi su sadržaji kisika, CO₂ na 0,1 %. Također se nametnuo i zahtjev za mjerenje koncentracije plinova svakih 30 minuta, što je mnogo češće nego kod konvencionalne CA. Ovakav sistem zahtijeva automatizaciju i kompjuterizaciju. Inicijalni stres (ILOS) koji nastaje zbog ultra niskog sadržaja kisika (ULO) može se pojaviti kod nekih sorti jabuka.

Još 1960. godine istraživanja su potvrdila da ubrzanje smanjenja O₂ u komorama odlaže dozrijevanje jabuka. Korist od bržeg smanjenja kisika CA je smanjenje proizvodnje etilena uz povećanje CO₂. ULO tehnologija dodatno usporava metaboličke promjene za oko 30% posebno u slučaju jabuka i bresaka, sprječava nastajanje nepovoljnih fizioloških promjena: uvenulost, gubitak hranjivih sastojaka i čvrstoće mesa što rezultira duljim vijekom trajanja kod voća.

2.3. Kontrola procesa

Kad se jednom zatvori komora, kvaliteta proizvoda se prati samo na osnovu praćenja procesnih stanja plina i temperature [3]. Kontrola stanja u CA komori može biti ON-line i OFF-line. Kod ON-line kontrole plinova senzori su postavljeni na odgovarajuća mjesta i povezani u sustav automatske regulacije, dok se kod OFF-line kontrole plinovi uzorci uzimaju sa predviđenih mjesta, a potom se analiziraju. U slučaju korištenja OFF-line kontrole svaki dan se kontrolira razina O₂ i CO₂, temperatura te vrijeme aktivnosti pojedinih uređaja.

Ako se kontrola procesnih stanja odvija automatski, koristi se mjerno-regulacijska tehnika koja sadrži više regulacijskih krugova zaduženih za održavanje vlažnosti, tlaka, temperature, sadržaja plinova i drugih stanja. Za ovaj način regulacije važna su kvalitetna mjerna osjetila koja se nalaze na referentnim mjestima i tako daju realnu sliku parametra koji se mjeri. Shema automatske regulacije prikazana je na slici 1.



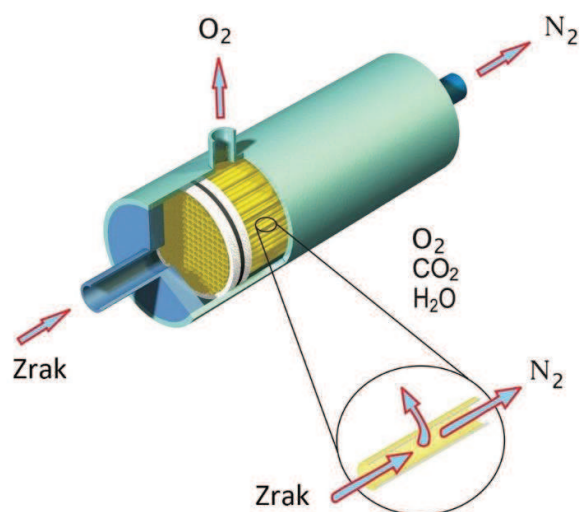
Slika 1. Shema automatske kontrole [3]

Svi regulacijski krugovi (za temperaturu, tlak, itd.) obično se kontroliraju preko ugrađenog PLC (eng. programmable logic controllers) sistema. PLC se integrira sa kompjuterskom podrškom te se dobiva uvid u povijest događaja unutar CA hladnjače. Tako se mogu i naknadno očitati parametri procesnih stanja kao što su temperatura, tlak itd. Procesna stanja unutar komore se održavaju uz pomoć izvršnih dijelova sustava a to su: generatori dušika, adsorberi, izmjenjivači topline (isparivač) itd.

2.3.1. Adsorber kisika

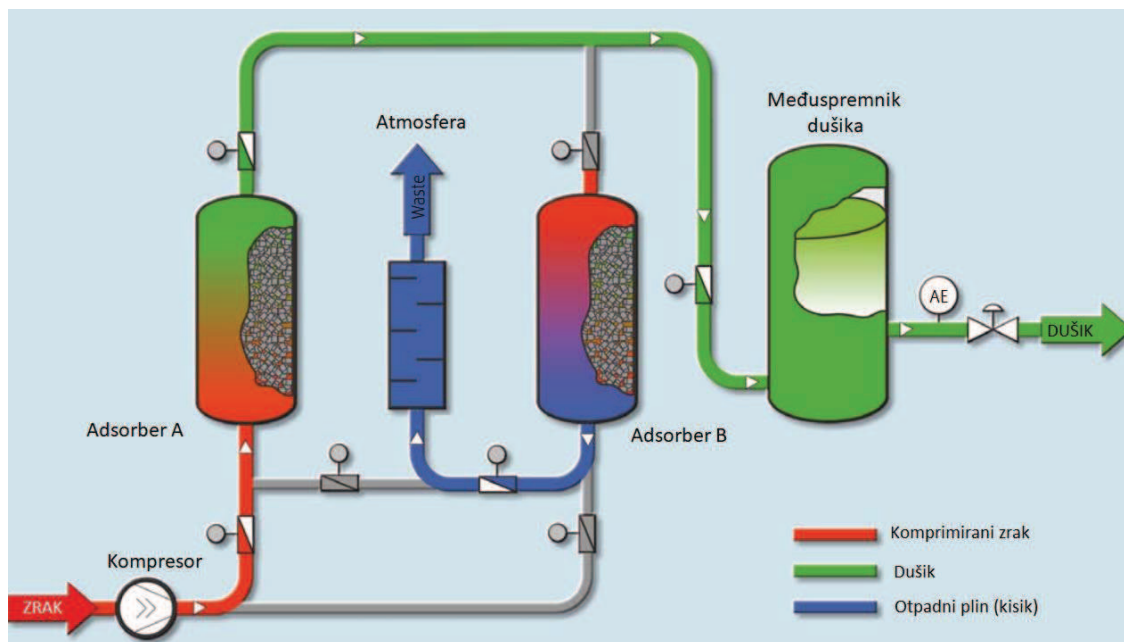
U kontroliranoj atmosferi vrlo je važno vrijeme potrebno da se uspostavi ULO režim. Za većinu sorti potrebno je da to vrijeme bude što kraće, najviše 3 dana. Da bi se kisik spustio sa standardnih 21% koliko ga ima u normalnom zraku potrebno je ubaciti čisti dušik. Dva su osnovna tipa uređaja kojima se taj proces provodi: membranski i adsorpcijski uređaj.

Membranski uređaj koristi membranski separator. Stlačeni se zrak dovodi do membranskih ćelija gdje plinovi s većim stupnjem permeabilnosti (kisik, vodena para, ugljikov dioksid) difundiraju kroz membranu dok se plinovi sa manjim stupnjem permeabilnosti (dušik) izdvajaju na drugom kraju uređaja.



Slika 2. Princip rada membranskog adsobera kisika

Adsorpcijski uređaj radi na principu adsorpcije kisika (slika 3). Sam uređaj sastoji se od dvije posude sa aktivnim ugljenom koje se naizmjenično zasićuju kisikom. Na taj se način postiže da se adsorpcija kisika provodi bez prekida. Sama posuda je pod pretlakom od 1 bar. Nakon zasićenja filter je potrebno regenerirati. Regeneracija se provodi vakuum pumpom koja stvara podtlak od 0,9 bar te se na taj način adsorbirani plinovi izbacuju u okoliš. S obzirom da adsorbicijom kisika u zraku ostaje visoka koncentracija dušika, ovaj uređaj se često naziva generatorom dušika.



Slika 3. Princip rada adsorpcijskog uređaja [4]

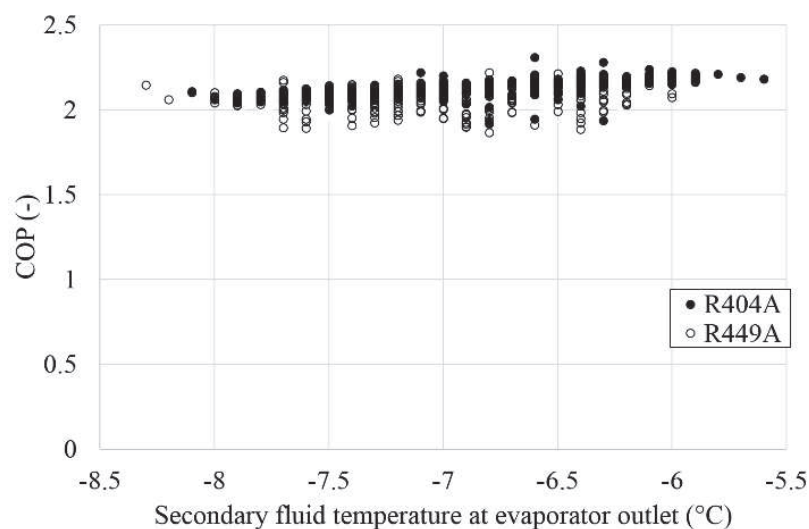
2.3.2. Adsorber za ugljični dioksid

Jabuke u komori "dišu" koristeći kisik pri čem se proizvodi ugljični dioksid. Prevelika koncentracija ugljičnog dioksida je štetna jer uzrokuje oštećenje ploda (truljenje). Mjernim instrumentima prati se količina CO_2 u komori te se ako je potrebno njegova koncentracija smanjuje. Iz tog razloga koristi se adsorber ugljičnog dioksida koji se sastoji od filtra s aktivnim ugljenom, niskotlačnog ventilatora, sustava za razvod i spremnika za zrak s niskim sadržajem kisika.

Adsorpcija ugljičnog dioksida provodi se preko filtera sa aktivnim ugljenom. Uz navedeni proces, adsorbira se i etilen. Nakon zasićenja filtera, adsorpcija prestaje te se provodi regeneracija filtera ispiranjem pomoću svježeg zraka. Izbor adsorbera ovisan je intenzitetu disanja, broju komora te o potrebnoj koncentraciji kisika i ugljičnog dioksida.

2.4. Radne tvari u sustavu

R449A je radna tvar sljedeće generacije bazirane na HFO (eng. *hydrofloroofelin*) skupini. Uveden je kao zamjena za radne tvari R404A i R507A. Kombinacija je odličnih rashladnih karakteristika i okolišnih svojstava. R449A je nezapaljiv, netoksičan te sa GWP-om od 1397 i ODP-om koji iznosi 0, nameće se kao dugoročno rješenje u rashladnoj tehnici. Koristi se kod niskih i srednjih radnih temperatura. Eksperiment proveden u [15] pokazuje da R449A u usporedbi sa R404A ima 3,6% manji COP za jednake uvjete (slika 4). R449A pokazuje manji rashladni kapacitet, ali i potrošnja energije za kompresor je manja pa je COP sličan onome sustavu koji koristi R44A.



Slika 4. Usporedba COP-a za R449A i R404A

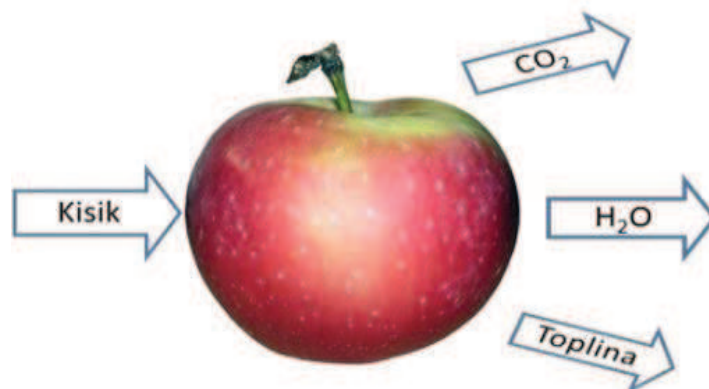
Propilen-glikol ($C_3H_8O_2$) je sintetički organski spoj, viskozna i bezbojna tekućina koja je približno bez mirisa. Može se miješati sa širokim spektrom otapala, uključujući vodu, aceton i kloroform. Propilen glikol koristi se osim za snižavanje točke smrzavanja vode, za proizvodnju nezasićenih poliesterskih smola, kao otapalo i kao konzervans u proizvodnji hrane i duhanskoj industriji. Propilen glikol se često koristi kao zamjena za etilen glikol zbog manje toksičnosti i boljih ekoloških svojstava. Negativna strana u odnosu na smjese sa etilen glikolom je manji kapacitet prijenosa topline i veća viskoznost. Prilikom razgradnje u površinskim vodama propilen glikol zahtjeva visoke količine kisika (eng. biochemical oxygen demand, BOD). Ovaj proces može utjecati na vodeni život potrošnjom kisika koji je potreban vodenim organizmima za život. Točka smrzavanja mješavine vode i 30% propilen glikola iznosi $-14^{\circ}C$.

3. JABUKA

Jabuka je listopadno drvo visoko od 1,8 do 4,6 m (odomaćene sorte) odnosno do 12 m u divljini [5]. Kada se kultivira, veličina, oblik i gustoća grana se određuje odabirom kalema i načinom obrezivanja. Listovi su naizmjenični, tamno zelene boje, jednostavno ovalni s djelomično nazubljenim ivicama, neznatno povijenim unutra. Cvjeta u proljeće a istovremeno iz pupoljaka izbijaju i listovi, koji rastu iz kraćih i nekih dužih izdanaka. Cvjetovi su veličine 3 do 4 cm, bijeli s blagim ružičastim nijansama koje postepeno nestaju, imaju pet latica, a grupirani su cvasti od 4 do 6 cvjetova. Plodovi sazrijevaju u kasno ljeto ili ranu jesen, uz veliki broj sorti u širokom rasponu različitih veličina ploda. Smatra se da postoji više od 7.500 poznatih sorti jabuka.

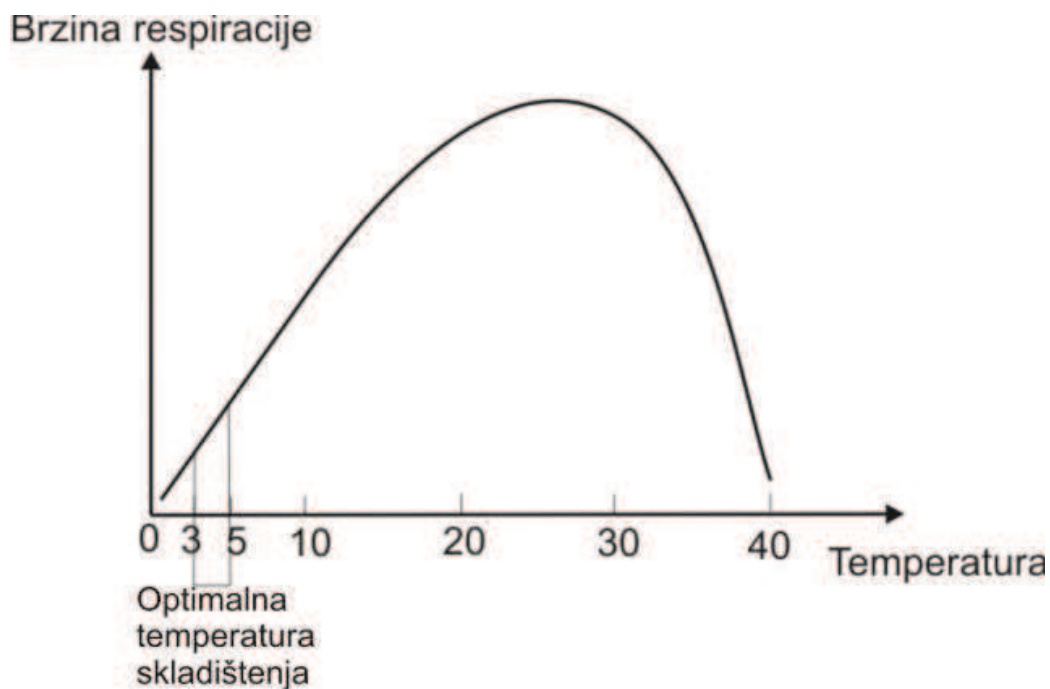
Vrijeme od berbe do rashlađivanja voća i povrća treba biti što kraće stoga je preporuka da se obrani plodovi rashlade istog dana. Brzo rashlađivanje plodova nakon berbe veoma je važno, jer se na taj način usporava proces zrenja i smanjuje pojava pojedinih fizioloških oboljenja. Svježi plodovi jabuke mogu se uspješno čuvati u rashladnom skladištu, odnosno hladnjači, ako su osigurani optimalni uvjeti za njihovo održavanje. Dužina uspješnog čuvanja uvelike ovisi o biološkim specifičnostima ploda pa se stoga i javljaju osjetne razlike u trajnosti pojedinih sorti. Jabuka spada u grupu voćnih vrsta čiji se plodovi u svježem stanju mogu čuvati duže nego plodovi većine drugih vrsta. Kod pojedinih sorti, plodovi se mogu čuvati i do 12 mjeseci. Na dužinu čuvanja utječe veliki broj faktora kao što su: sorta, kvaliteta ploda, regija proizvodnje, priprema za skladištenje, pakiranje, način skladištenja i drugo. Pri tome se podrazumijeva da je berba obavljena u optimalnom roku.

Kao što je ranije navedeno u plodu jabuke nakon berbe se i dalje odvija disanje (respiracija) i različiti procesi dozrijevanja (slika 5). Da bi plod tokom čuvanja što duže zadržao kvalitetu koju je imao prilikom berbe, potrebno je spomenute procese i usporiti. Jabuke sintetiziraju etilen koji ima vrlo važnu ulogu u starenju i dozrijevanju. S obzirom da su jabuke osjetljive na egzogeni etilen, potrebno je odvajati ga iz zraka u komorama s kontroliranom atmosferom.



Slika 5. Disanje jabuka

Temperatura je najvažniji faktor koji utječe na voće poslije berbe, jer ima apsolutni utjecaj na brzinu bioloških reakcija, metabolizam i respiraciju. Kod većine biljnih vrsta porast temperature od 0 do 30°C izaziva eksponencijalni porast respiracije (slika 6). U pravilu, brzina respiracije raste u fazi dozrijevanja, a sniženjem temperature respiracija se usporava. Pri temperaturi smrzavanja respiracija prestaje [7].



Slika 6. Ovisnost brzine respiracije o temperaturi [7]

Prilikom određivanja temperature čuvanja treba uzeti u obzir sortu, dužinu čuvanja i željeno stanje plodova na kraju skladištenja. Plodovi većine sorti jabuka mogu podnijeti temperature od $-1,4$ do $-2,8^{\circ}\text{C}$, ali se čuvanje na temperaturama ispod 0°C rijetko koristi kod jabuke. Za svaku sortu postoji kritična temperatura ispod koje, u slučaju dužeg čuvanja, dolazi do pojave različitih fizioloških oboljenja. Optimalna temperatura čuvanja većine sorti jabuka kreće se od 0 do 3°C . Većina kultiviranih sorti jabuka skladišti se u ambijentu sa sadržajem O_2 od 1% do $2,5\%$ i CO_2 od $0,3\%$ do $2,5\%$ (tablica 3). Za naknadno dozrijevanje jabuka, poslije čuvanja se koriste komore koje su nepropusne za plinove. Od sorte jabuka zavisi i atmosfera naknadnog dozrijevanja.

Tablica 3. Preporučeni uvjeti CA atmosfere [6]

Naziv jabuke	$\vartheta_{\text{skladištenja}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Rel. vlažnost (%)	$\vartheta_{\text{smrzavanja}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Vrijeme skladištenja	CA uvjeti
Delišes	0	90-95	-1,5	7-9 mjeseci	$2.5\% \text{O}_2 + 2.5\% \text{CO}_2$
Z. delišes	0	90-95	-1,5	5-7 mjeseci	$1.5-2\% \text{O}_2 + 1-3\% \text{CO}_2$
Newtown	4	90-95	-1,5	1-2 mjeseca	$2-3\% \text{O}_2 + 1-2\% \text{CO}_2$
Idared	0	90-95	-1,5	7-8 mjeseci	$2-3\% \text{O}_2 + 2-3\% \text{CO}_2$
Gala	0	90-95	-1,5	5-7 mjeseci	$2.5\% \text{O}_2 + 2.5\% \text{CO}_2$

3.1. Jodno-škrobni test

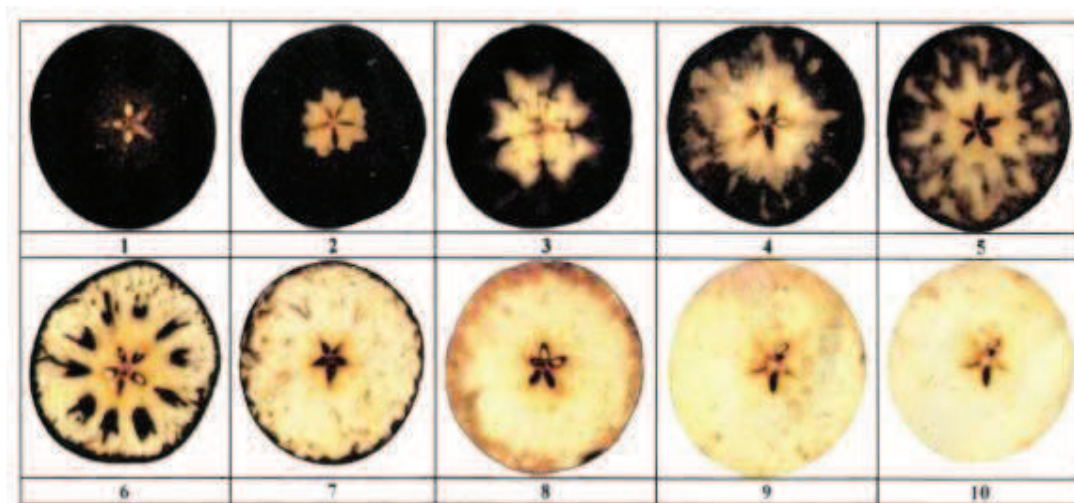
Kontrola dozrijevanja plodova je važna da bi se odredio pravi trenutak za početak berbe.

Razlikuju se različiti tipovi zrelosti voća i povrća:

- Botanička-fiziološka zrelost (voće i povrće imaju maksimalnu veličinu i sjemenke su dozrele)
- Tehnološka zrelost (voće i povrće je najbolje za preradu)
- Konzumna zrelost (voće i povrće je najbolje za konzumaciju)

Jedan od najsigurnijih načina za utvrđivanje dozrelosti jabuka je kemijskim putem pomoću jodno-škrobnog testa (joj-jod-kalij test ili J-J-K).

Ovim testom se mjeri količina škroba u plodu jabuke s ciljem određivanja pravog trenutka kada je omjer šećera i škroba najpovoljniji. Postupak obavljanja jodno-škrobnog testa se sastoji od uzimanja dobrog prosječnog uzorka od 5 do 10 jabuka. Plod jabuke prereže se uzdužno. Tretira se sa nekoliko kapi otopine jod-jod-kalija. Poslije nekoliko minuta donosi se ocjena o zrelosti plodova na osnovi peterodijelne ljestvice intenziteta obojenosti presjeka ploda (slika 7). Razgradnja škroba počinje od sredine ploda prema potkožici ploda. Škrob se najsporije razgrađuje 2-4 mm ispod potkožice te u blizini provodnih snopića koji idu iz peteljki.



Slika 7. Ljestvica intenziteta obojenosti presjeka ploda [16]

1-2

- Crno-plava boja na cijeloj površini presjeka
- plodovi su potpuno zeleni

3-4

- površina plodova oko sjemene kućice i provodnih kanala neobojena je, ostala je površina presjeka crnoplava
- započela je faza dozrijevanja ploda

5-6

- na tamnoj osnovi cijelog presjeka ploda javlja se prosvjetljavanje, a parenhim je ploda obojen tamnoplavo samo pod pokožicom
- optimalno stanje za dugo čuvanje

7-8

- tamno obojenje ispod pokožice plodova i dijela parenhima, oko provodnih kanala
- plodovi su samo za kraće čuvanje i prijevoz

9-10

- plodovi su ispod pokožice na presjeku neznatno potamnjeni ili potpuno svijetli
- konzumna zrelost

4. PRORAČUN GUBITAKA TOPLINE

Termodinamički proračun izveden je na osnovu podataka dobivenih iz diplomskog rada za građevinski dio i tehnološki dio (uvjeti u hladnjačama). Projektni uvjeti za područje kontinentalne Hrvatske korišteni u proračunu su:

$$\vartheta_{ok} = 32^{\circ}\text{C}$$

$$\rho = 60\%$$

4.1. Transmisijski gubici hladionice 1

Osjetna toplina, odnosno toplinski tok dobiven kroz zidove, pod i strop računa se izrazom:

$$\Phi_{tr} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (1)$$

gdje je:

Φ_{tr} [W] - toplinski tok

A [m²] - površina kroz koju se odvija prolaz topline

$\Delta\vartheta$ [°C] - razlika između vanjske temperature zraka (ili temperature susjednog prostora) i temperature hlađenog prostora

k [W/m²K] - ukupni koeficijent prolaza topline

4.1.1. Izolacija zidova i stropa hladionice 1

Ukupni koeficijent prolaza topline računa se sljedećom jednačinom:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (2)$$

$$k_{zs} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,120}{0,023} + \frac{1}{11}} = 0,187 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

gdje je:

δ [m] - debljina pojedinog sloja u višeslojnoj građevinskoj konstrukciji

λ [W/mK] - koeficijent toplinske vodljivosti građevnog materijala

α_i [W/m²K] - unutarnji koeficijent prijelaza topline

$\alpha_i \approx 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ za dinamično hlađenje u hlađenom prostoru

α_o [$\text{W/m}^2\text{K}$] - vanjski koeficijent prijelaza topline

$\alpha_o \approx 11 \text{ W/m}^2\text{K}$ za miran zrak u hlađenom prostoru

Za proračun je uzeta U-vrijednost koeficijenta prolaza topline iz kataloga prema [8].

$$U = 0,183 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

4.1.2. Izolacija poda hladionice 1

+

• šljunak	$\delta_s = 500\text{mm}$	$\lambda_s = 0,81 \text{ W/mK}$
• AB ploča	$\delta_{AB} = 200\text{mm}$	$\lambda_{AB} = 2,6 \text{ W/mK}$
• hidroizolacija	$\delta_h = 10\text{mm}$	$\lambda_h = 0,23 \text{ W/mK}$
• cementni estrih	$\delta_{ce} = 20\text{mm}$	$\lambda_{ce} = 1,6 \text{ W/mK}$
• PE folija	$\delta_{PE} = 0,2\text{mm}$	$\lambda_{PE} = 0,5 \text{ W/mK}$
• poliuretan	$\delta_p = 200\text{mm}$	$\lambda_p = 0,024 \text{ W/mK}$
• PE folija	$\delta_{PE} = 0,2\text{mm}$	$\lambda_{PE} = 0,5 \text{ W/mK}$
• betonska podloga	$\delta_{bp} 100\text{mm}$	$\lambda_{bp} = 2 \text{ W/mK}$

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda}}$$

(3)

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,5}{0,81} + \frac{0,2}{2,6} + \frac{0,01}{0,23} + \frac{0,02}{1,6} + 2 \cdot \frac{0,0002}{0,5} + \frac{0,2}{0,024} + \frac{0,1}{2}}$$

$$k_p = 0,1089 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

4.1.3. Rezultati

Dobiveni rezultati toplinskog toka zbog transmisije u hladionici 1 prikazanu su u tablici 4.

Tablica 4. Transmisijski gubici hladionice 1

	A	$\Delta\vartheta$	ϕ
	m ²	°C	kW
zid 1	95,2	31	0,55
zid 2	55,25	31	0,32
zid 3	55,25	27,8	0,29
strop	72,8	31	0,42
pod	72,8	11	0,09
Σ			1,67

4.2. Toplinsko opterećenje od hlađenih proizvoda

Čini ga toplinsko opterećenje robe unesene u hladionicu. Odvedena toplina za hlađenje robe od početne temperature do temperature točke zamrzavanja računa se:

$$Q_{hl} = m \cdot c_{p1} \cdot (\vartheta_{pp} - \vartheta_0) \quad (4)$$

$$Q_{hl} = 0,14 \cdot 155000 \cdot 3,78 \cdot (17 - 1) = 1312416 \text{ kJ}$$

gdje je:

Q_{hl} [kJ] - odvedena toplina od proizvoda

m [kg] - masa dnevnog unosa proizvoda (14% ukupne mase)

c_{p1} [kJ/kgK] - specifični toplinski kapacitet proizvoda iznad temperature zamrzavanja [1]

ϑ_{pp} [°C] - početna temperatura proizvoda (17°C)

ϑ_0 [°C] - krajnja temperatura proizvoda (1°C)

Rashladni kapacitet potreban za hlađenje proizvoda računa se na sljedeći način:

$$\Phi_r = \frac{Q_{hl}}{3600 \cdot \tau} \quad (5)$$

$$\Phi_r = \frac{1312416}{3600 \cdot 13} = 28,04 \text{ kW}$$

gdje je:

Φ_r [kW] - toplinsko opterećenje od robe

τ [h] - vrijeme hlađenja

4.3. Toplinsko opterećenje od pakiranja

$$\Phi_{pak} = \frac{m_p \cdot c_{pp} \cdot (\vartheta_{pp} - \vartheta_0)}{3600 \cdot \tau} \quad (6)$$

$$\Phi_{pak} = \frac{0,14 \cdot 155000 \cdot 0,035 \cdot 1,7 \cdot (17 - 1)}{3600 \cdot 10} = 0,478 \text{ kW}$$

gdje je:

Φ_{pak} [kW] - toplinsko opterećenje od pakiranja

m_p [kg] - masa pakiranja (3,5%)

c_{pp} [kJ/kgK] - specifični toplinski kapacitet pakiranja [9]

Masa pakiranja obično iznosi 2-5% mase proizvoda.

4.4. Toplinsko opterećenje zbog disanja robe

$$\Phi_d = \frac{m \cdot q_d}{10^6} \quad (7)$$

$$\Phi_d = \frac{155000 \cdot 10,2}{10^6} = 1,58 \text{ kW}$$

gdje je:

m [kg] - masa svježeg voća ili povrća

q_d [W/tona] - toplina disanja koja prema [1] za jabuku iznosi 10,2 W/t pri 0°C

4.5. Toplinsko opterećenje zbog infiltracije zraka

Infiltracija se najčešće pojavljuje zbog razlike u gustoći zraka između prostorija. Zračna masa koja izlazi jednaka je zračnoj masi koja ulazi. Zrak se može namjerno dovesti u skladište kako bi se smanjila koncentracija plinova, uklonili mirisi uskladištene robe i omogućio rad ljudi u skladištu. Tada govorimo o namjernoj ventilaciji. Nenamjerno zrak dopijeva u prostoriju infiltracijom i prilikom otvaranja vrata radi manipulacije ili pregleda robe, radova u skladištu i sl. Izmijenjeni toplinski tok uslijed infiltracije zraka računa se prema:

$$\Phi_v = \frac{n_i \cdot V_g}{24 \cdot 3600} \cdot \rho_u \cdot (h_v - h_u) \quad (8)$$

$$\Phi_v = \frac{3,39 \cdot 619}{24 \cdot 3600} \cdot 1,2754 \cdot (69 - 10) = 1,857 \text{ kW}$$

gdje je:

Φ_v [kW] - toplinski tok uslijed infiltracije zraka

V_g [m³] - volumen hlađene prostorije

ρ_u [kg/m³] - gustoća zraka pri temperaturi prostorije

h_v [kJ/kg] - specifična entalpija infiltriranog zraka pri temperaturi od 29°C i relativnoj vlažnosti od 60%

h_u [kJ/kg] - specifična entalpija infiltriranog zraka u hlađenoj prostoriji pri temperaturi od 1°C i relativnoj vlažnosti od 90%

n_i [1/24h] - broj izmjena zraka u 24 sata dobiven iz tablice 4

Tablica 5. Broj izmjena zraka u 24h [1]

Građevinski volumen V_g (m ³)	Broj izmjena za 24 sata n_i	Građevinski volumen V_g (m ³)	Broj izmjena za 24 sata n_i
5,66	44,0	226,0	5,5
14,5	26,0	566,0	3,5
56,6	12,0	1130,0	2,3
113,0	8,2	2830,0	1,4

4.6. Toplinsko opterećenje od rasvjete

Sva električna energija oslobođena u hlađeni prostor mora se uključiti u unutrašnje toplinsko opterećenje. Predani toplinski tok od rasvjete računa se:

$$\Phi_d = \frac{A \cdot q_A \cdot \tau}{24 \cdot 1000} \quad (9)$$

$$\Phi_d = \frac{72,8 \cdot 10 \cdot 8}{24 \cdot 1000} = 0,243 \text{ kW}$$

gdje je:

A [m²] - površina poda

q_A [W/m²] - intenzitet rasvjete (snaga električne rasvjete po 1 m²)

- ovisi o tipu hlađenog prostora i njegovom volumenu,

- pretpostavka: $q_A = 5 - 15 \text{ W/m}^2$

τ [h] - broj sati uključenosti rasvjete po danu

4.7. Toplinsko opterećenje od ljudi

Utjecaj ljudi se dodaje toplinskom opterećenju, i to opterećenje zavisi o temperaturi u hlađenom prostoru, vrsti rada koji obavljaju, odjeći i veličini osobe. Toplinsko opterećenje osobe može se procijeniti pomoću jednakosti:

$$q_p = 272 - 6 \cdot \vartheta_0 \quad (10)$$

$$q_p = 272 - 6 \cdot 0 = 272 \text{ W/osoba}$$

gdje je:

ϑ_0 [°C] - temperatura hlađenog prostora

Ukupno toplinsko opterećenje ljudi iznosi:

$$\Phi_{lj} = \frac{q_p \cdot n_p \cdot \tau}{24 \cdot 1000} \quad (11)$$

$$\Phi_{lj} = \frac{272 \cdot 2 \cdot 4}{24 \cdot 1000} = 0,091 \text{ kW}$$

gdje je:

n_p - broj ljudi

τ [h] - vrijeme provedeno u hladnom prostoru

4.8. Toplinsko opterećenje od viličara

Transportna sredstva se koriste za manipulaciju robe i transport ljudi unutar hladnih prostora te zbog toga mogu imati velik bitan utjecaj na rashladno opterećenje prostora. Rashladno opterećenje uslijed rada viličara računa se prema:

$$\Phi_{vil} = P_{vil} \cdot \eta_{vil} \cdot \frac{\tau}{24} \quad (12)$$

$$\Phi_{vil} = 10 \cdot 0,9 \cdot \frac{4}{24} = 2,25 \text{ kW}$$

gdje je:

P_{vil} [kW] - snaga viličara

η_{vil} [-] - iskoristivost viličara

τ [h] - vrijeme provedeno u hladnom prostoru

Zbog jednake visine komora za sve komore odabran je isti tip viličara. Iz toga slijedi da je za sve komore toplinsko opterećenje od viličara jednako.

4.9. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača

Ako je tip (veličina) isparivača poznata toplinsko opterećenje je približno jednako električnoj snazi ventilatora. Ova vrijednost može se izračunati:

$$\Phi_{EM} = f \cdot \sum \Phi_i \quad (13)$$

$$\Phi_{EM} = 0,05 \cdot 38,54 = 1,93 \text{ kW}$$

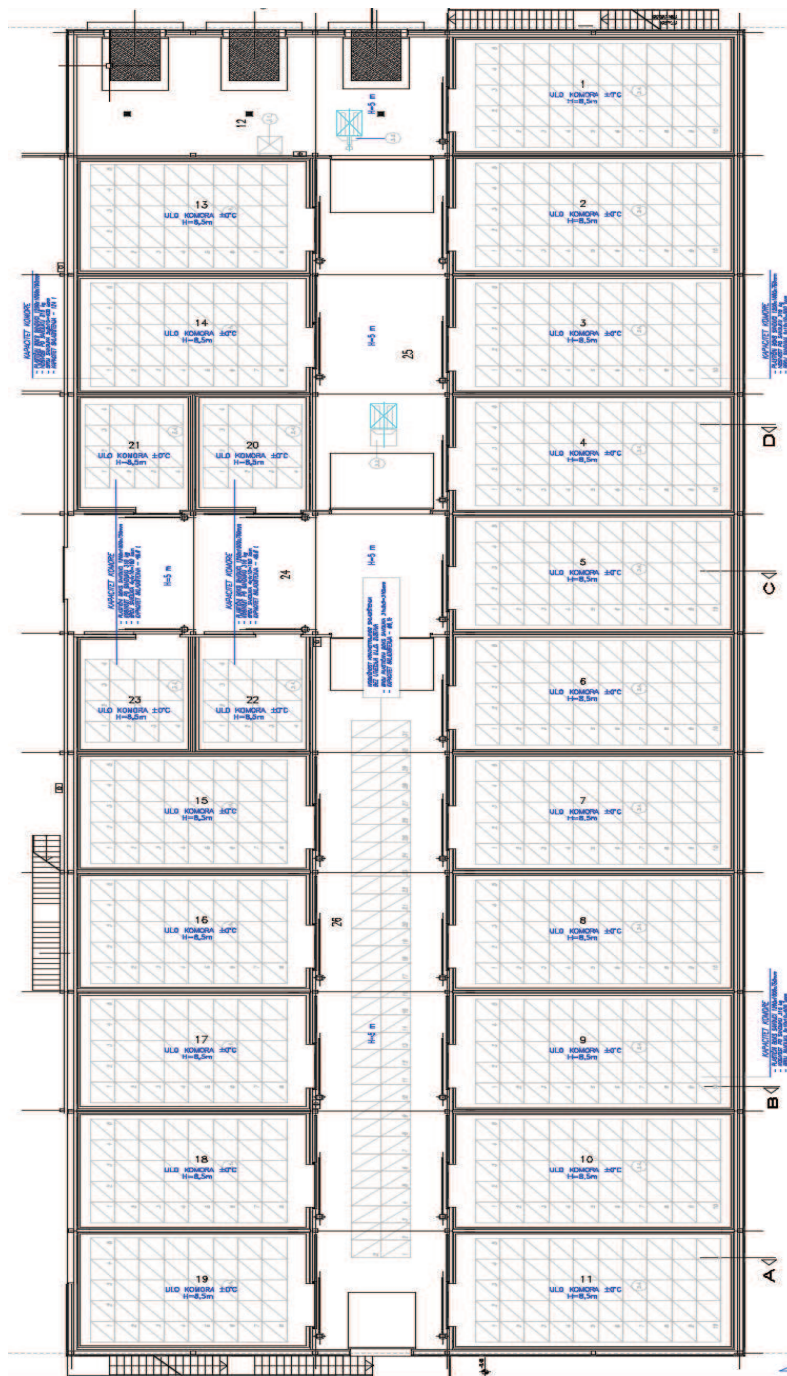
gdje je:

f - faktor za procjenu rada ventilatora

Φ_l - suma toplinskih opterećenja zbog transmisije, hlađenja proizvoda, ishlapljivanja proizvoda, infiltracije zraka, električne rasvjete i topline ljudi

4.10. Ukupno toplinsko opterećenje

U sljedećim tablicama dani su podaci o pojedinom toplinskom opterećenju za svaku hladionicu te je na slici 7 prikazan tlocrt svih rashladnih komora.



Slika 8. Tlocrt rashladnih komora

Tablica 6. Transmisijsko opterećenje komora

Broj hladionice	Temperatura skladištenja [°C]	Transmisijsko opterećenje [kW]
1, 11	0	1,67
2 - 10	0	1,11
13	0	1,41
14 - 18	0	1,00
19	0	1,45
20, 22	0	0,67
21, 23	0	0,70

Tablica 7. Opterećenje komora zbog hlađenja robe

Broj hladionice	Kapacitet hladionice [kg]	Opterećenje od hlađenja robe [kW]
1 - 11	155 000	28,04
13 - 19	124 000	22,43
20 - 23	49 600	8,97

Tablica 8. Opterećenje komora od pakiranja

Broj hladionice	Masa pakiranja [kg]	Opterećenje od pakiranja [kW]
1 - 11	759,5	0,48
13 - 19	607,6	0,38
20 - 23	243,04	0,15

Tablica 9. Opterećenje komora zbog disanja robe

Broj hladionice	Kapacitet hladionice [kg]	Opterećenje od disanja robe [kW]
1 - 11	155 000	1,58
13 - 19	124 000	1,26
20 - 23	49 600	0,51

Tablica 10. Opterećenje komora zbog infiltracije zraka

Broj hladionice	Volumen hladionice [m ³]	Opterećenje zbog infiltracije zraka [kW]
1 - 11	618,8	1,83
13 - 19	496,6	1,69
20 - 23	237,49	1,12

Tablica 11. Opterećenje komora od rasvjete

Broj hladionice	Površina poda [kg]	Opterećenje od rasvjete [kW]
1 - 11	72,8	0,24
13 - 19	58,42	0,19
20 - 23	27,94	0,09

Tablica 12. Opterećenje komora od elektromotora isparivača

Broj hladionice	Suma toplinskih opterećenja [kW]	Opterećenje od elektromotora isparivača [kW]
1, 11	38,54	1,93
2 - 10	37,99	1,90
13	31,61	1,58
14 - 18	31,21	1,56
19	31,66	1,58
20, 22	14,63	0,73
21, 23	14,66	0,73

Ako je centralni rashladni sustav korišten za više hladnjača ukupno, rashladno opterećenje nije suma svih maksimalnih opterećenja svih hladnjača. Stvarno ukupno rashladno opterećenje je umanjeno za faktor koji iznosi 0,7-0,9. Ukupno toplinsko opterećenje je prikazano u tablici 11. U proračun je uzet i faktor sigurnosti koji iznosi 1,05 kako bi se uskladile nejednolikosti između projektnih i radnih uvjeta.

Tablica 13. Ukupno rashladno opterećenje svih hladionica

Broj hladionice	Ukupno rashladno opterećenje [kW]	Ukupno rashladno opterećenje s faktorom sigurnosti [kW]
1	37,16	39,02
2	36,58	38,41
3	36,58	38,41
4	36,58	38,41
5	36,58	38,41
6	36,58	38,41
7	36,58	38,41
8	36,58	38,41
9	36,58	38,41
10	36,58	38,41
11	37,16	39,02
13	30,38	31,90
14	29,95	31,45
15	29,95	31,45
16	29,95	31,45
17	29,95	31,45
18	29,95	31,45
19	30,43	31,95
20	13,75	14,44
21	13,79	14,48
22	13,75	14,44
23	13,79	14,48
	Σ	702,67
	faktor istovremenosti 0,8	562,14

5. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA

U nekim je slučajevima potrebno ili ekonomski opravdano koristiti medij za prijenos topline iz hladionice do isparivača - sekundarni nosilac topline, koji se hladi u isparivaču. Potrebno je predvidjeti dva odvojena cjevovoda: sustav primarne radne tvari (primarni krug) i sustav sekundarnog nosioca topline za prijenos topline (sekundarni krug).

Prednosti sustava za hlađenje s medijem za prijenos topline u odnosu na neposredne (direktne) sustave su u tome što radna tvar ne može doći u dodir s hlađenom robom u slučaju propuštanja, temperature u hladionici mogu se jednostavnije regulirati proporcionalnim umjesto dvopoložajnim regulatorima te je sustav fleksibilniji u slučaju nedostatka pogonske energije. Za veće razgranate sustave hlađenja općenito je potrebno manje primarne radne tvari nego kod sustava s neposrednim hlađenjem. Nedostaci su sustava s medijem za prijenos topline veći investicijski i pogonski troškovi te slabiji faktor hlađenja.

5.1. Termodinamički proces radne tvari R449a

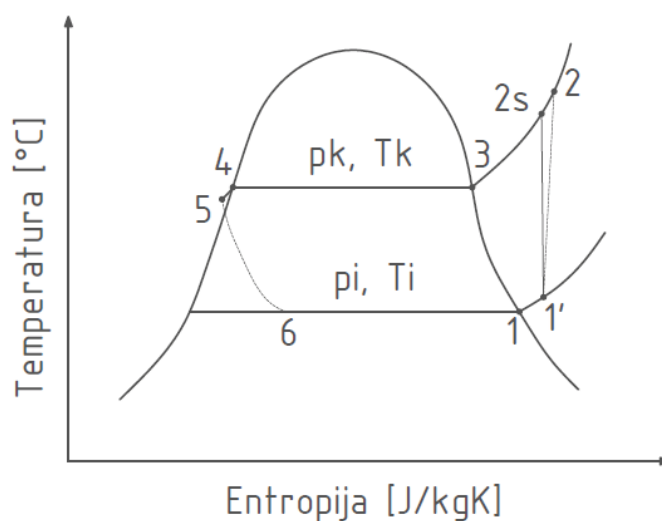
Prije određivanja veličina stanja rashladnog procesa potrebno je odrediti potrebne temperature. Na temelju ulaznih podataka odredit će se karakteristične točke rashladnog procesa, a potom i pripadajući učinak kondenzatora, odnosno potrebna snaga kompresora. Ukupno toplinsko opterećenje korišteno u procesu zbog sigurnosti iznosi 600 kW, a sustav se dijeli u dva kruga radne tvari kao što je prikazano u pojednostavljenoj shemi na slici 10.

Toplinski učinak isparivača	$\Phi_0 = 300 \text{ kW}$
Razlika temperature kondenzacije i okoliša	$\Delta\vartheta_k = 8 \text{ }^\circ\text{C}$
Pregrijanje	$\Delta\vartheta_{pr} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$
Pothlađenje	$\Delta\vartheta_{po} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura isparavanja	$\vartheta_i = -7 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura kondenzacije	$\vartheta_k = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Izentropski stupanj djelovanja kompresora	$\eta_s = 0,7$

Za određivanje veličina stanja točkica rashladnog procesa koriste se podaci iz [10] za radnu tvar R449a kao što je prikazano u tablici 14 i na slici 9.

Tablica 14. Točke rashladnog procesa

	ϑ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1	-7	4,02	394,8	1,742
1'	-3	4,02	398,5	1,756
2s	56,1	16,6	433	1,756
2	69	16,6	447,8	1,8
3	40	16,6	412,8	1,693
4	40	16,6	260,7	1,203
5	37	16,6	255,8	1,188
6	-7	4,02	255,8	1,23



Slika 9. T,s-dijagram s karakterističnim točkama procesa

Uzima se u obzir izentropski stupanj djelovanja, jer kompresor u realnom procesu ne provodi kompresiju pri konstantnoj entropiji. Odabrani izentropski stupanj djelovanja iznosi $\eta_{iz} = 0,7$.

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_{1'}}{h_2 - h_{1'}} \quad (5.1)$$

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_{1'} + h_{1'} \cdot \eta_{iz}}{\eta_{iz}} = 447,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Iz izračunatog rashladnog opterećenja od 300 kW dobivamo protočnu masu radne tvari:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_0}{h'_1 - h_6} = 2,102 \frac{kg}{s} \quad (5.2)$$

Uz poznati maseni protok, do snage kompresora dolazimo sljedećom jednadžbom:

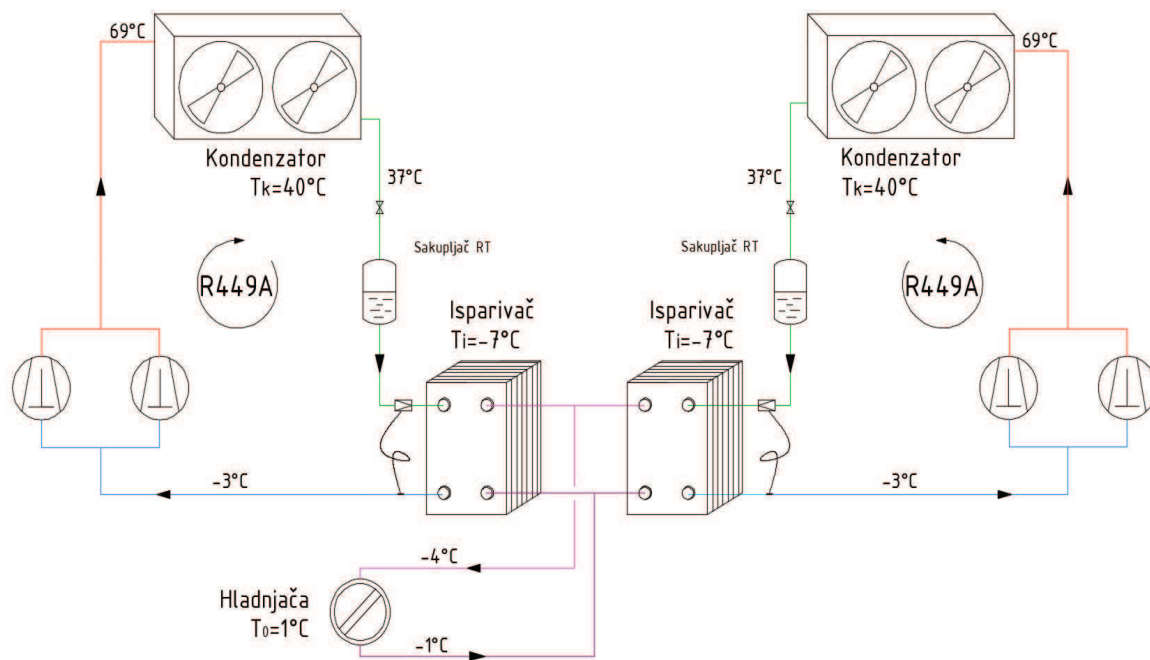
$$P_k = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h'_1) = 103,6 kW \quad (5.3)$$

Na jednak način dobiva se i toplinski učin kondenzatora:

$$\Phi_k = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_5) = 403,6 kW \quad (5.4)$$

Iz prethodno dobivenih veličina računa se faktor hlađenja koji nam pokazuje omjer dobivenog rashladnog učina i snage kompresora.

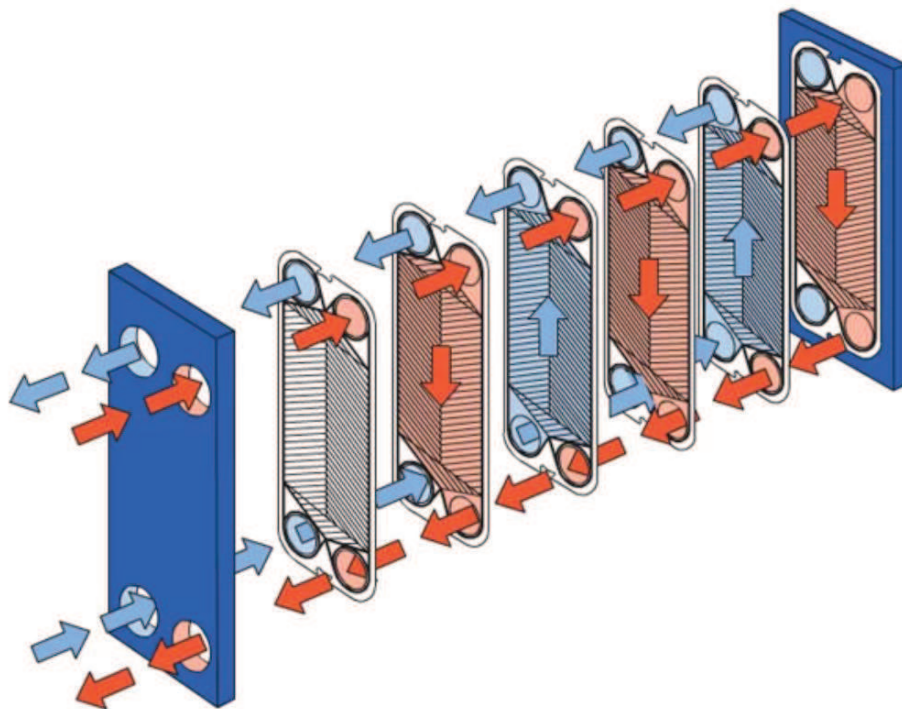
$$\varepsilon_{hl} = \frac{\Phi_0}{P_k} = \frac{300}{103,6} = 2,89 \quad (5.5)$$



Slika 10. Pojednostavljeni prikaz sustava

5.2. Proračun pločastog isparivača

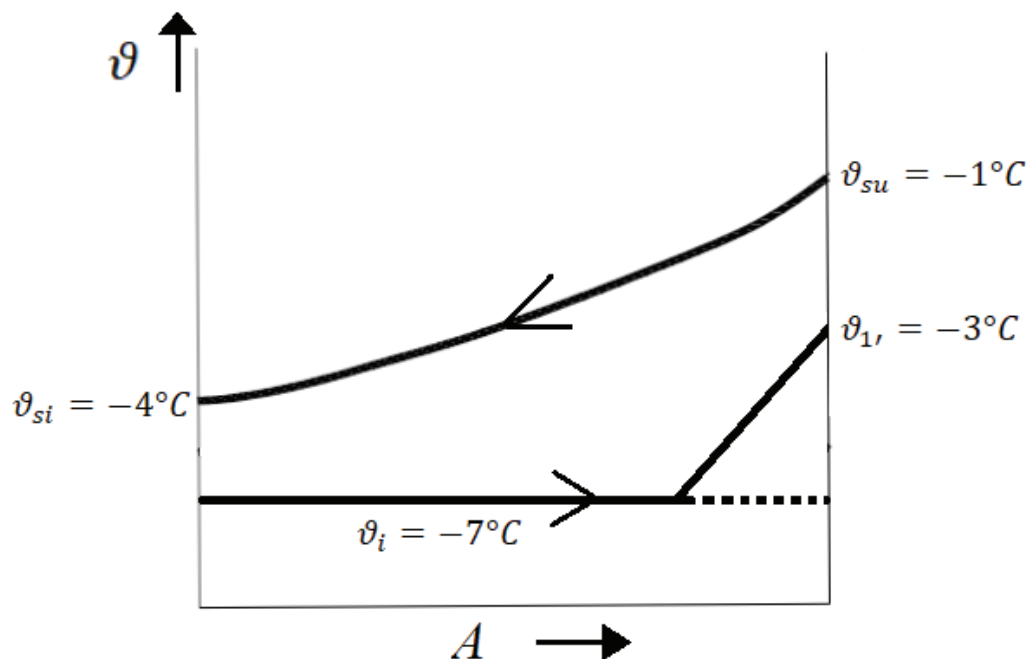
U procesu se koristi pločasti isparivač s radnom tvari R449A i 30%-tnom smjesom propilen glikola i vode. Navedena smjesa se u isparivaču hladi te se zatim šalje prema sustavu za hlađenje proizvoda. Isparivač ima rashladni učin od 300 kW. Način rada ovog uređaja prikazan je na slici 11. Na slici 12 prikazana je raspodjela temperatura u ovom uređaju.



Slika 11. Princip rada pločastog izmjenjivača

Parametri potrebni za proračun:

- | | |
|--|---|
| • Temperatura smjese vode i propilen glikola na ulazu | $\vartheta_{su} = -1^{\circ}\text{C}$ |
| • Temperatura smjese vode i propilen glikola na izlazu | $\vartheta_{si} = -4^{\circ}\text{C}$ |
| • Gustoća pri srednjoj temperaturi | $\rho_s = 1036 \text{ kg/m}^3$ |
| • Specifični toplinski kapacitet smjese | $c_s = 3,856 \text{ kJ/kgK}$ |
| • Koeficijent toplinske vodljivosti | $\lambda_s = 0,427 \text{ W/mK}$ |
| • Dinamička viskoznost | $\eta_s = 8,947 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$ |
| • Prandtlov broj | $Pr = 91$ |
| • Maseni protok sekundara | $q_{ms} = \Phi_0 / (c_s \cdot \Delta\vartheta_s)$ |
| | $q_{ms} = 25,934 \text{ kg/s}$ |



Slika 12. T,A-dijagram isparivača

Radna tvar R449A:

- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -7^{\circ}\text{C}$
- Entalpija RT na ulazu u isparivač $h_6 = 255,8 \text{ kJ/kg}$
- Entalpija RT na izlazu iz isparivača $h_1 = 394,8 \text{ kJ/kg}$
- Maseni protok radne tvari $q_{mRT} = 3,963 \text{ kg/s}$
- Specifični toplinski kapacitet kapljevine (-7°C) $c_{kap} = 1,3861 \text{ kJ/kgK}$
- Specifični toplinski kapacitet pare (-7°C) $c_{sp} = 0,9388 \text{ kJ/kgK}$
- Dinamička viskoznost kapljevine (-7°C) $\eta_{kap} = 207,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
- Dinamička viskoznost pare (-7°C) $\eta_{sp} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
- Toplinska provodnost kapljevine (-7°C) $\lambda_{kap} = 0,09511 \text{ W/mK}$
- Toplinska provodnost kapljevine (-7°C) $\lambda_{sp} = 0,011452 \text{ W/mK}$
- Gustoća kapljevine (-7°C) $\rho_{kap} = 1222,4 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća pare (-7°C) $\rho_{sp} = 17,7 \text{ kg/m}^3$

Odabir dimenzija isparivača:

- Visina isparivača $L = 0,7 \text{ m}$
- Širina isparivača $H = 0,5 \text{ m}$
- Kut orebrenja isparivača $\beta = 45^\circ$
- Faktor površine isparivača [13] $\phi = 1,22$
- Dubina orebrenja (širina kanala) $b = 0,002 \text{ m}$
- Ekvivalentni promjer kanala $d_e = 0,00328 \text{ m}$
 $d_e = 2 \cdot b / \phi = 2 \cdot 0,002 / 1,22$
- Broj ploča isparivača $N = 180$
- Površina jednog kanala $A_c = 0,001 \text{ m}^2$
 $A_c = H \cdot b = 0,5 \cdot 0,002$

5.2.1. Prijelaz topline na strani smjese vode i propilen glikola

Broj kanala za strujanje smjese:

$$N_s = \frac{N}{2} = \frac{180}{2} = 90 \quad (5.6)$$

Brzina strujanja kroz kanal:

$$w_s = \frac{q_{ms}}{A_c \cdot \rho_s \cdot N_s} \quad (5.7)$$

$$w_s = \frac{q_{ms}}{A_c \cdot \rho_s \cdot N_s} = \frac{25,934}{0,001 \cdot 1036 \cdot 90} = 0,2781 \text{ m/s}$$

Reyno-ldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_s = \frac{w_s \cdot d_e \cdot \rho_s}{\eta_s} \quad (5.8)$$

$$Re_s = \frac{0,2781 \cdot 0,00328 \cdot 1036}{0,008947} = 106$$

Nusseltova značajka računata je prema proračunu Wanniarachchi (2009 ASHRAE Handbook-Fundamentals) te vrijedi za sljedeće parametre:

$$Re = 1 \div 10^4$$

$$\beta = 20^\circ \div 62^\circ$$

Faktori potrebni za proračun Nusseltova broja:

$$Nu_l = 3,65 \cdot \beta^{-0,455} \cdot \Phi^{0,661} \cdot Re_s^{0,339} \quad (5.9)$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 45^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 106^{0,339} = 3,5742$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot \beta \quad (5.10)$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 45 = 0,696$$

$$Nu_t = 312,6 \cdot \beta^{-0,142} \cdot \Phi^{1-m} \cdot Re_s^m \quad (5.11)$$

$$Nu_t = 312,6 \cdot 40^{-0,142} \cdot 1,22^{1-0,696} \cdot 106^{0,696} = 4,4273$$

$$Nu_s = (Nu_l^3 + Nu_t^3)^{\frac{1}{3}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (5.12)$$

$$Nu_s = (3,5742^3 + 4,4273^3)^{\frac{1}{3}} \cdot 91^{\frac{1}{3}} = 22,92$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_s = \frac{Nu_s \cdot \lambda_s}{d_e} \quad (5.13)$$

$$\alpha_s = \frac{22,92 \cdot 0,427}{0,00328} = 2985 \frac{W}{m^2 K}$$

5.2.2. Prijelaz topline na strani radne tvari R449A

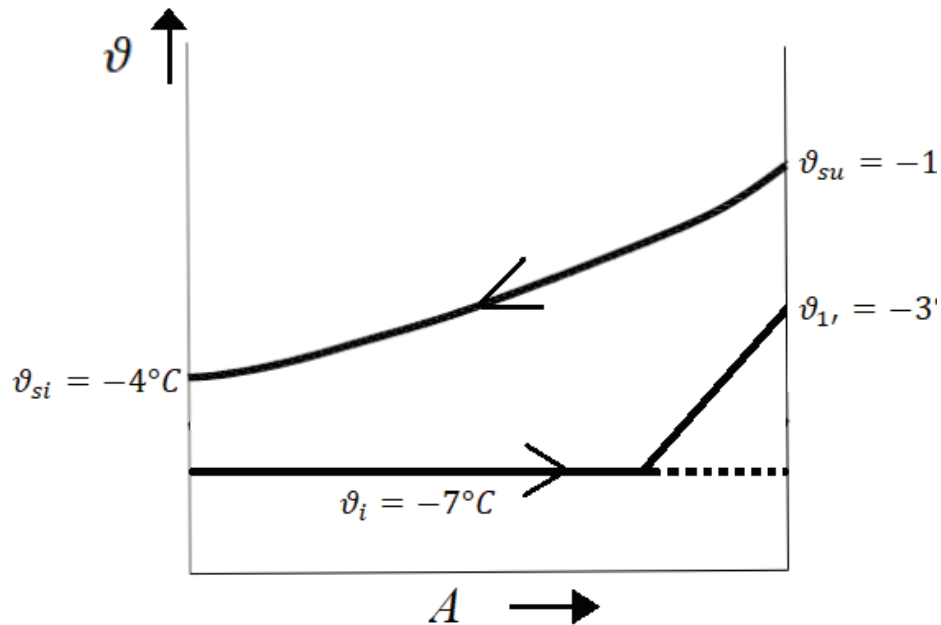
Prema Lazarek i Black – za dvofazno strujanje u jako tankim cijevima pretpostavljen toplinski tok iznosi:

$$q_A = 3910 \frac{W}{m^2}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{su} - \vartheta_i) - (\vartheta_{si} - \vartheta_i)}{\ln \frac{\vartheta_{su} - \vartheta_i}{\vartheta_{si} - \vartheta_i}} \quad (5.14)$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(-1 + 7) - (-4 + 7)}{\ln \frac{-1 + 7}{-4 + 7}} = 4,328 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Slika 13. T,A-dijagram isparivača

Broj kanala za strujanje radne tvari:

$$N_f = \frac{N}{2} - 1 = \frac{180}{2} - 1 = 89 \quad (5.15)$$

Maseni protok po m² poprečnog presjeka:

$$G = \frac{q_{mRT}}{A_c \cdot N_f} \quad (5.16)$$

$$G = \frac{2,102}{0,001 \cdot 89} = 23,621 \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

Boilingov bezdimenzijski broj:

$$B_{OA} = \frac{q_A}{G \cdot (h_1 - h_6)} \quad (5.17)$$

$$B_{OA} = \frac{3910}{23,621 \cdot (394,8 - 255,8)} = 0,001191$$

Viskoznost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\eta_x = \eta_{kap} + x(\eta_{sp} - \eta_{kap}) \quad (5.18)$$

Toplinska provodnost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\lambda_x = \lambda_{kap} + x(\lambda_{sp} - \lambda_{kap}) \quad (5.19)$$

Reynolds-ov bezdimenzijski broj:

$$Re_x = \frac{G \cdot d_e}{\eta_x} \quad (5.20)$$

Nusselt-ov bezdimenzijski broj:

$$Nu_x = 30 \cdot Re_x^{0,875} \cdot B_{OA}^{0,714} \quad (5.21)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_e} \quad (5.22)$$

U tablici 12 prikazan je tok iterativnog procesa sa pomakom sadržaja pare od 0,1 - 0,2 dok je proračun napravljen sa korakom od 0,05.

Tablica 15. Proračun koeficijenata prijelaza topline na strani RT

Sadržaj pare x [kg/kg]	η [Pa s]	λ [W/mK]	Re	Nu	α [W/m ² K]
0,2	0,00016804	0,0784	819	65,202	1254,97
0,4	0,000128781	0,0616	1069	82,248	1243,6
0,5	0,000109151	0,0533	1261	95,053	1244,97
0,6	8,95212E-05	0,0449	1512	113,065	1246,57
0,7	6,98914E-05	0,0365	1969	140,43	1258,48
0,8	5,02616E-05	0,0282	2738	187,36	1297,65
1	0,000011002	0,0115	12510	707,913	1999,18

Srednji koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_A = \frac{\sum \alpha_x}{7} \quad (5.23)$$

$$\alpha_A = \frac{1524,97 + 1243,6 + 1245 + 1246,57 + 1258,48 + 1297,65 + 1999,18}{7}$$

$$\alpha_A = 1316,63 \frac{W}{m^2K}$$

5.2.3. *Provjera pretpostavljenog toplinskog toka*

- Toplinska vodljivost ploče (čelik) $\lambda_{\zeta} = 50 \text{ W/mK}$
- Debljina ploče $\delta = 0,0006 \text{ m}$

Koeficijent prolaza topline:

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta}{\lambda_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_A}} \quad (5.24)$$

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{2985} + \frac{0,0006}{50} + \frac{1}{1316,63}} = 903,73 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Toplinski tok

$$q_A = k_A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (5.24)$$

$$q_A = 903,73 \cdot 4,328 = 3911,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Iteracija je ispravna jer je dobiveni toplinski tok približno jednak pretpostavljenom (3910 W/m²).

5.2.4. *Potrebna površina za izmjenu topline*

Površina izmjene topline za odabrani izmjenjivač:

$$A_{UK1} = \Phi \cdot L \cdot H \cdot N \quad (5.25)$$

$$A_{UK1} = 1,22 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 180 = 76,86 \text{ m}^2$$

Potrebna površina za izmjenu topline:

$$A_{UK2} = \frac{\Phi_o}{q_A} = \frac{300\,000}{3911,4} = 76,698 \text{ m}^2 \quad (5.26)$$

Postotak predimenzioniranosti izmjenjivača:

$$\Delta A = \frac{A_{UK1}}{A_{UK2}} \cdot 100 - 100 \quad (5.27)$$

$$\Delta A = \frac{76,86}{76,698} \cdot 100 - 100 = 0,21 \%$$

Projektirani pločasti isparivač veći je za 0,21% od teorijski potrebnog.

5.3. Proračun kondenzatora

Proračun zrakom hlađenog kondenzatora provodi se prema [12]. Ukupno toplinsko opterećenje iznosi 403,64 kW. U sustavu se koriste dva istovjetna kondenzatora hlađena zrakom. Kondenzator se sastoji od dvije istovjetne sekcije (slika 14).

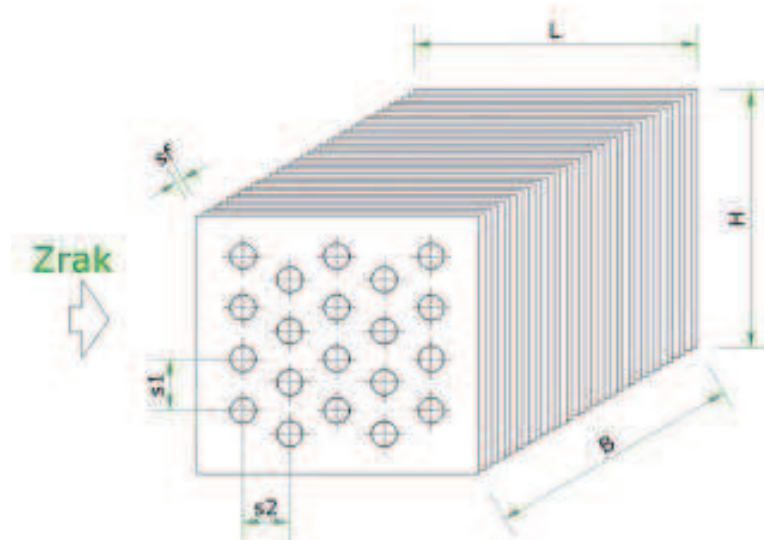


Slika 14. Kondenzator hlađen zrakom u V izvedbi

Ulazni parametri:

$Q_k = 201,8 \text{ kW}$	-toplinsko opterećenje dobiveno proračunom
$\vartheta_{a1} = 32^\circ\text{C}$	-temperatura zraka na ulazu u kondenzator
$\vartheta_{a2} = 37^\circ\text{C}$	-pretpostavljena temperatura nakon kondenzatora
$\vartheta_{\text{sup}} = \vartheta_2 = 69^\circ\text{C}$	- temperatura nakon kompresora
$\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$	- temperatura kondenzacije
$d_e = 12 \text{ mm}$	-vanjski promjer cijevi kondenzatora
$d_i = 10 \text{ mm}$	-unutarnji promjer cijevi kondenzatora
$f_t = 0,2 \text{ mm}$	-debljina lamela
$s_f = 3 \text{ mm}$	- razmak između lamela

$i_r = 4$	– broj stupaca cijevi isparivača
$i_t = 50$	– broj cijevi po stupcu
$i_{in} = 12$	– broj ulaznih cijevi
$s_1 = 3 \text{ mm}$	– vertikalni razmak cijevi
$s_2 = 35 \text{ mm}$	– horizontalni razmak cijevi



Slika 15. Kondenzator hlađen zrakom-parametri

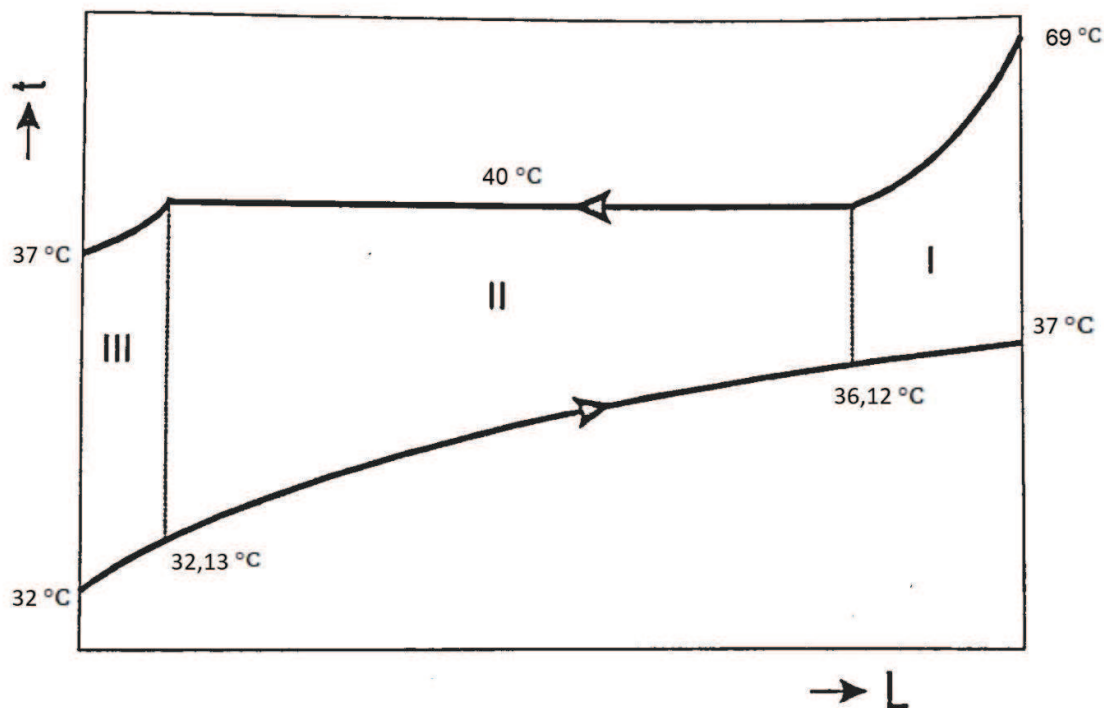
Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_{a2} - \vartheta_{a1}}{\ln \frac{\vartheta_k - \vartheta_{a1}}{\vartheta_k - \vartheta_{a2}}} = \frac{37 - 32}{\ln \frac{40 - 32}{40 - 37}} = 5,1^\circ\text{C} \quad (5.28)$$

Srednja temperatura zraka:

$$\vartheta_m = \vartheta_k - \Delta\vartheta_m = 34,9^\circ\text{C} \quad (5.29)$$

Na slici 16 prikazana je raspodjela temperatura u ovisnosti o duljini kondenzatora a detaljni proračun temperatura dobivenih u dijagramu prikazan je u nastavku proračuna.



Slika 16. T,L- dijagram kondenzatora

Svojstva zraka (34,9°C):

- Gustoća $\rho_a = 1,1284 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_a = 1,007 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_a = 0,026711 \text{ W/mK}$
- Kinematička viskoznost $\nu_a = 1,679 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Maseni protok zraka:

$$q_{ma} = \frac{Q_k}{c_a \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{201,8}{1,007 \cdot (37 - 32)} = 40,083 \text{ kg/s} \quad (5.30)$$

Volumni protok zraka:

$$q_{va} = \frac{q_{ma}}{\rho_a} = \frac{40,083}{1,1284} = 35,522 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.31)$$

Fizikalna svojstva vrele kapljevine R449A (40°C):

- Gustoća $\rho_k = 1023,7 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_k = 1,6883 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_k = 0,07308 \text{ W/mK}$
- Kinematička viskoznost $\nu_k = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Dinamička viskoznost $\eta_k = 114 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$

Fizikalna svojstva suhozasićene pare R449A (40°C):

- Gustoća $\rho_p = 76,461 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_p = 1,3572 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost $\lambda_p = 0,01695 \text{ W/mK}$
- Kinematička viskoznost $\nu_p = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Dinamička viskoznost $\eta_p = 13,33 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$

Vanjska površina cijevi između lamela:

$$A_{mt} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,03519 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad (5.32)$$

Površina lamela:

$$A_f = 2 \cdot \frac{s_1 \cdot s_2 - \pi \frac{d_e^2}{4}}{s_f} = 0,6246 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad (5.33)$$

Vanjska površina prolaza topline po 1m duljine cijevi:

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,6598 \frac{m^2}{m} \quad (5.34)$$

Unutarnja površina prijelaza topline za 1m cijevi.

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i = 0,03142 \frac{m^2}{m} \quad (5.35)$$

Omjer unutarnje i vanjske površine prijelaza topline

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = 21 \quad (5.36)$$

Visina izmjenjivača topline

$$H = i_t \cdot s_1 = 1,75 \text{ m} \quad (5.37)$$

Dubina izmjenjivača topline:

$$L = i_r \cdot s_2 = 0,12 \text{ m} \quad (5.37)$$

Entalpije radne tvari R449A za odabrani proces (40°C):

- pregrijanje $h_2 = 446,2 \text{ kJ/kg}$
- kondenzacija $h_3 = 412,8 \text{ kJ/kg}$
- pothlađenje $h_4 = 260,7 \text{ kJ/kg}$
- pothlađenje $h_5 = 255,8 \text{ kJ/kg}$

Desuperheater u zoni I:

$$q_I = h_2 - h_3 = 33,4 \text{ kJ/kg} \quad (5.38)$$

Pothlađivanje u zoni III:

$$q_{III} = h_4 - h_5 = 4,9 \text{ kJ/kg} \quad (5.39)$$

Toplina kondenzacije po 1kg radne tvari:

$$q_k = q_I + (h_3 - h_4) + q_{III} = 190,4 \text{ kJ/kg} \quad (5.40)$$

Maseni protok radne tvari:

$$q_{m,RT1} = \frac{Q_k}{q_k} = 1,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (5.41)$$

Maseni protok kroz cijevi:

$$G = \frac{q_{m,RT1}}{i_{in} * \pi * \frac{d_i^2}{4}} = 1124,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \quad (5.42)$$

Desuperheater zona I:

$$\Phi_{sup} = q_{m,RT1} \cdot q_I = 35,4 \text{ kW} \quad (5.43)$$

Toplina kondenzacije zona II:

$$\Phi_{lat} = q_{m,RT1} \cdot (h_3 - h_4) = 161,22 \text{ kW} \quad (5.44)$$

Toplina pothlađivanja zona III:

$$\Phi_{sub} = q_{m,RT1} \cdot q_{III} = 5,19 \text{ kW} \quad (5.45)$$

Temperatura zraka na ulazu u zonu I:

$$t_{aI} = t_{a2} - \frac{\Phi_{sup}}{q_{ma} \cdot c_a} = 36,12 \text{ °C} \quad (5.46)$$

Temperatura zraka na izlazu iz zone III:

$$t_{aIII} = t_{a1} + \frac{\Phi_{sub}}{q_{ma} \cdot c_a} = 32,13 \text{ °C} \quad (5.47)$$

Srednja logaritamska temperatura pojedine zone:

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(\vartheta_{sup} - \vartheta_{a2}) \cdot ((\vartheta_k - \vartheta_{aI}))}{\ln \frac{\vartheta_{sup} - \vartheta_{a2}}{\vartheta_k - \vartheta_{aI}}} = 12,96 \text{ °C} \quad (5.48)$$

$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{aIII}) \cdot ((\vartheta_k - \vartheta_{aI}))}{\ln \frac{\vartheta_k - \vartheta_{aIII}}{\vartheta_k - \vartheta_{aI}}} = 5,64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.49)$$

$$\Delta\vartheta_{mIII} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{aIII}) \cdot ((\vartheta_{sub} - \vartheta_{a1}))}{\ln \frac{\vartheta_{sup} - \vartheta_{a2}}{\vartheta_k - \vartheta_{a1}}} = 6,327 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.50)$$

Koeficijent prolaza topline na strani zraka ovisi o brzini zraka, odnosno dimenzijama koje u ovom dijelu proračuna nisu poznate. Također koeficijent prolaza topline tokom kondenzacije u cijevima ovisi o specifičnom toplinskom toku koji ovisi o dimenzijama. Specifični toplinski tok je različit u sve tri zone. Stoga se u nastavku proračuna za svaku zonu pretpostavlja koeficijent prolaza topline, te se zatim pretpostavlja specifični toplinski tok nakon čega slijedi iteriranje dok se pretpostavljene vrijednosti ne izjednače s vrijednostima dobivenim na kraju proračuna.

ZONA I

$$k_{eI} = 28 \frac{W}{m^2K}$$

$$q_{e,trI} = k_{eI} \cdot \Delta\vartheta_{mI} = 362,97 \frac{W}{m^2} \quad (5.51)$$

Specifični toplinski tok (unutarnja površina prijelaza topline):

$$q_{i,trI} = q_{e,trI} \cdot \beta = 7623 \frac{W}{m^2} \quad (5.52)$$

Unutarnja površina prijelaza topline:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{sup}}{q_{i,trI}} = 4,64 \text{ } m^2 \quad (5.53)$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovI} = \frac{A_{iI}}{A_{i1}} = 147,83 \text{ } m \quad (5.54)$$

Duljina cijevi u jednom redu za zonu I:

$$L_{1I} = \frac{L_{ovI}}{i_r} = 36,96 \text{ m} \quad (5.55)$$

ZONA II

$$k_{eII} = 36 \frac{W}{m^2 K}$$

$$q_{e,trI} = k_{eI} \cdot \Delta\vartheta_{mII} = 203,06 \frac{W}{m^2} \quad (5.56)$$

Specifični toplinski tok (unutarnja površina prijelaza topline):

$$q_{i,trII} = q_{e,trII} \cdot \beta = 4264,52 \frac{W}{m^2} \quad (5.57)$$

Unutarnja površina prijelaza topline:

$$A_{iII} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{i,trII}} = 37,806 \text{ m}^2 \quad (5.58)$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovII} = \frac{A_{iII}}{A_{i1}} = 1203,39 \text{ m} \quad (5.59)$$

Duljina cijevi u jednom redu za zonu I:

$$L_{1II} = \frac{L_{ovII}}{i_r} = 300,85 \text{ m} \quad (5.60)$$

ZONA III

$$k_{eIII} = 29 \frac{W}{m^2 K}$$

$$q_{e,trIII} = k_{eIII} \cdot \Delta\vartheta_{mIII} = 183,5 \frac{W}{m^2} \quad (5.61)$$

Specifični toplinski tok (unutarnja površina prijelaza topline):

$$q_{i,trIII} = q_{e,trIII} \cdot \beta = 3853,72 \frac{W}{m^2} \quad (5.62)$$

Unutarnja površina prijelaza topline:

$$A_{iIII} = \frac{\Phi_{sup}}{q_{i,trIII}} = 1,35 m^2 \quad (5.63)$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ovIII} = \frac{A_{iIII}}{A_{i1}} = 42,9 m \quad (5.64)$$

Duljina cijevi u jednom redu za zonu I:

$$L_{1III} = \frac{L_{ovIII}}{i_r} = 10,73 m \quad (5.65)$$

Širina kondenzatora:

$$B = \frac{L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}}{i_r} \approx 7 m \quad (5.66)$$

Najmanja površina u poprečnom presjeku (između cijevi i lamela) kroz koju struji zrak:

$$A_z = (L_{1I} + L_{1II} + L_{1III}) \cdot (s_1 - d_e) \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 7,48 m^2 \quad (5.67)$$

Brzina strujanja zraka u najmanjem presjeku:

$$w = \frac{\dot{V}_a}{A_z} = 4,75 \frac{m}{s} \quad (5.68)$$

5.3.1. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{ekv}}\right)^m \quad (5.69)$$

$$d_{eqv} = \frac{2(s_1 - d_e)(s_f - f_t)}{s_1 - d_e + s_f - f_t} = 0,00499 \text{ m} \quad (5.70)$$

$$Re = w * \frac{d_{eqv}}{v_a} = 1412 \quad (5.71)$$

$$n = 0,45 + 0,0066 * \left(\frac{L}{d_{eqv}}\right) = 0,6086 \quad (5.72)$$

$$m = -0,28 + 0,08 * \left(\frac{Re}{1000}\right) = -0,1671 \quad (5.73)$$

Koeficijent C_{1A} ovisi o omjeru L/d_{eqv} :

L/deqv	5	10	20	30	40	50
C1A	0,412	0,326	0,201	0,125	0,08	0,0475

$$\frac{L}{d_{eqv}} = 24,04 \rightarrow C_{1A} = 0,17$$

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 * \left(\frac{Re}{1000}\right) = 1,02 \quad (5.74)$$

$$C_1 = C_{1A} * C_{1B} = 0,174 \quad (5.75)$$

$$Nu = 0,182 \cdot 1222^{0,6086} \cdot \left(\frac{0,12}{0,00499}\right)^{-0,1671} = 8,45$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka za šahovski raspored cijevi:

$$\alpha_a = 1,1 \cdot Nu \cdot \frac{\lambda_a}{d_{ekv}} = 49,72 \frac{W}{m^2K} \quad (5.76)$$

Koeficijent prijelaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi:

$$\alpha_{ai} = \alpha_a \cdot \frac{A_f \cdot E \cdot C_k + A_{mt}}{A_{i1}} \quad (5.77)$$

$$E = \frac{th(m_f \cdot h_f)}{m_f \cdot h_f} \quad (5.78)$$

$$m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_a}{f_t \cdot \lambda_f}} = 48,77 \frac{1}{m} \quad (5.79)$$

$\lambda_f = 209 W/mK$ – toplinska provodnost materijala lamela (aluminij)

$$A_{f1} = s_1 = 0,035m$$

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = 0,0347 \quad (5.80)$$

$$\rho_f = 1,27 \left(\frac{B_f}{d_e}\right) * \sqrt{\frac{A_{f1}}{B_f}} - 0,3 = 3,0923 \quad (5.81)$$

$$h_f = 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \rho_f) = 0,0175 \quad (5.82)$$

$$E = \frac{th(48,77 \cdot 0,0175)}{48,77 \cdot 0,0175} = 0,8116$$

$$\alpha_{ai} = 49,72 \cdot \frac{0,6246 \cdot 0,8116 \cdot 0,99 + 0,03519}{0,03142} = 849,92 \frac{W}{m^2K}$$

5.3.2. Koeficijent prijelaza topline na strani RT (kondenzacija u cijevi)

$$Re_k = \frac{w_l \cdot d_i}{\nu_l} = \frac{G \cdot d_i}{\eta_l} = 98655 \quad (5.83)$$

Za Reynolds-ove brojeve $Re_l > 5000$ i ako je:

$$Re_k \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_p}\right)^{0,5} = 360983 > 20000$$

proizlazi sljedeća jednadžba:

$$Nu = 0,026 \cdot Pr_l^{\frac{1}{3}} \cdot \left[Re_k \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_p}\right)^{0,5} + Re_k \right]^{0,8} \quad (5.84)$$

$$Pr_k = \frac{c_k \cdot \eta_k}{\lambda_k} = 2,633 \quad (5.85)$$

$$Nu = 1216,4$$

$$\alpha_{RII} = \frac{Nu \cdot \lambda_k}{d_i} = 8889,5 \frac{W}{m^2K} \quad (5.86)$$

Ukupni koeficijent prolaza topline sveden na unutarnji promjer:

$$k_{iII} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_o \frac{1}{\beta} + R_t \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{RII}}} = 765,81 \frac{W}{m^2K} \quad (5.87)$$

gdje su faktori onečišćenja:

$$R_t = \frac{(d_e - d_i)/2}{\lambda_{cu}} = 2,7 \cdot 10^{-6} \frac{m^3K}{W}$$

$$R_o = 0,0003 \frac{m^3K}{W}$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{iII} = k_{iII} \cdot \vartheta_{mII} = 4319,5 \frac{W}{m^2K} \quad (5.89)$$

Potrebna površina za prijelaz topline za za zonu II:

$$A_{iII} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{iII}} = 37,32 m^2 \quad (5.90)$$

5.3.3. Zona I (para radne tvari ulazi u cijev)

Volumni protok radne tvari:

$$\dot{V}_I = \frac{q_{m,RT1}}{\rho_I} = \frac{1,06}{62,5} = 0,0170 \frac{m^3}{s} \quad (5.91)$$

Brzina radne tvari u cijevima:

$$w_{sup} = \frac{\dot{V}_I}{\left(i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^4}{4}\right)} \approx 18 \frac{m}{s} \quad (5.92)$$

Reynolds-ov broj:

$$Re_I = \frac{w_{sup} \cdot d_i}{\nu_I} = 1384209 \quad (5.93)$$

$$B_I = 0,023 \cdot \rho^{0,8} \cdot c^{0,4} \cdot \lambda^{0,6} \cdot \eta^{-0,4} = 83,812 \quad (5.94)$$

$$\alpha_{RI} = B_I \frac{w_{sup}^{0,8}}{d_i^{0,2}} = 2125,32 \frac{W}{m^2K} \quad (5.95)$$

Ukupni koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu:

$$k_{iI} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_o \frac{1}{\beta} + R_t \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{RI}}} = 601 \frac{W}{m^2K} \quad (5.96)$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{iI} = k_{iI} \cdot \vartheta_{mI} = 7791,07 \frac{W}{m^2K} \quad (5.97)$$

Potrebna površina za prijelaz topline za za zonu I:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{sup}}{q_{iI}} = 4,544 m^2 \quad (5.98)$$

5.3.4. Zona III (kapljevina radne tvari ulazi u cijev)

Volumni protok radne tvari:

$$\dot{V}_{III} = \frac{q_{m,RT1}}{\rho_{III}} = \frac{1,06}{1023,7} = 0,00104 \frac{m^3}{s} \quad (5.99)$$

Brzina radne tvari u cijevima:

$$w_{sub} = \frac{\dot{V}_{III}}{\left(i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^4}{4}\right)} = 1,1 \frac{m}{s} \quad (5.100)$$

Reynolds-ov broj:

$$Re_{III} = \frac{w_{sub} \cdot d_i}{\nu_{III}} = 99876 \quad (5.101)$$

$$B_{III} = 0,023 \cdot \rho^{0,8} \cdot c^{0,4} \cdot \lambda^{0,6} \cdot \eta^{-0,4} = 904,4 \quad (5.102)$$

$$\alpha_{R_{III}} = B_I \frac{w_{sub}^{0,8}}{d_i^{0,2}} = 2449,3 \frac{W}{m^2K} \quad (5.103)$$

Ukupni koeficijent prolaza topline u zoni I sveden na unutarnju površinu:

$$k_{iIII} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_o \frac{1}{\beta} + R_t \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{R_{III}}}} = 624,4 \frac{W}{m^2K} \quad (5.104)$$

Specifični toplinski tok:

$$q_{iIII} = k_{iIII} \cdot \vartheta_{mIII} = 3950,7 \frac{W}{m^2K} \quad (5.105)$$

Potrebna površina za prijelaz topline za za zonu III:

$$A_{iIII} = \frac{\Phi_{sub}}{q_{iIII}} = 1,315 m^2 \quad (5.106)$$

5.3.5. Konačne vrijednosti proračuna kondenzatora

Ukupna potrebna površina prijelaza topline:

$$A_i = A_{iI} + A_{iII} + A_{iIII} \quad (5.107)$$

$$A_i = 4,54 + 37,32 + 1,315 = 43,183 \text{ m}^2$$

Nastrojna brzina zraka:

$$w_f = \frac{\dot{V}_a}{B \cdot H} = \frac{35,52}{5,43 \cdot 2,1} = 2,912 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.108)$$

Pad tlaka zraka:

$$\Delta p = 0,233 \cdot i_r \cdot \left[\frac{s_2}{s_f - f_t} \right]^{0,42} \cdot (w \cdot \rho_a)^{1,8} \quad (5.109)$$

$$\Delta p = 0,233 \cdot 4 \cdot \left[\frac{0,035}{0,003 - 0,0002} \right]^{0,42} \cdot (4,75 \cdot 1,1284)^{1,8} = 51,78 \text{ Pa}$$

Dimenzije jedne sekcije kondenzatora:

- Visina 1,75 m
- Širina 0,12 m
- Duljina 7 m

5.4. Proračun dimenzija cjevovoda

5.4.1. Tlačni vod

- Preporučene brzina strujanja u cjevovodu $10 \div 15 \text{ m/s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja $w_t = 12,5 \text{ m/s}$
- Gustoća radne tvari $\rho_t = 62,5 \text{ kg/m}^3$
- Maseni protok radne tvari $q_{m,RT} = 3,963 \text{ kg/s}$

Potreban unutarnji promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_t \cdot \pi \cdot w_t}} \quad (5.110)$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,1}{62,5 \cdot \pi \cdot 12,5}} = 58,5 \text{ mm}$$

Odabrana je bakrena cijev : Cu Ø64 x 2 mm

Stvarna brzina strujanja:

$$w_t = \frac{4 \cdot q_{m,rt}}{d_u^2 \cdot \pi \cdot \rho_T} = 11,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.111)$$

5.4.2. Usisni vod

- Preporučene brzina strujanja u cjevovodu $8 \div 12 \text{ m/s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja $w_u = 10 \text{ m/s}$
- Gustoća radne tvari $\rho_u = 17,7 \text{ kg/m}^3$
- Maseni protok radne tvari $q_{m,RT} = 3,963 \text{ kg/s}$

Potreban unutarnji promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_u \cdot \pi \cdot w_u}} \quad (5.112)$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,1}{17,7 \cdot \pi \cdot 10}} = 123 \text{ mm}$$

Odabrana je čelična bešavna cijev : DN125 $\phi 133 \times 5 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_t = \frac{4 * q_{m,rt}}{d_u^2 * \pi * \rho_T} = 10 \frac{m}{s} \quad (5.113)$$

5.4.3. *Kapljevinski vod*

- Preporučene brzina strujanja u cjevovodu $0,5 \div 1 \text{ m/s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja $w_k = 0,8 \text{ m/s}$
- Gustoća radne tvari $\rho_k = 1130 \text{ kg/m}^3$
- Maseni protok radne tvari $q_{m,RT} = 3,963 \text{ kg/s}$

Potreban unutarnji promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_k \cdot \pi \cdot w_k}} \quad (5.114)$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,963}{1130 \cdot \pi \cdot 0,8}} = 54,4 \text{ mm}$$

Odabrana je bakrena cijev : Cu $\phi 60 \times 2,5 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_t = \frac{4 * q_{m,rt}}{d_u^2 * \pi * \rho_T} = 0,783 \frac{m}{s} \quad (5.115)$$

5.4.4. Dimenzioniranje cjevovoda i pumpe sekundarnog kruga

Cijevni razvod posrednog prijenosnika energije proteže se od strojarnice do pojedinih hladnjaka zraka. Sastoji se od bešavnih čeličnih cijevi kroz koje struji 30%-tna smjesa propilen-glikola i vode. Zbog veće gustoće i viskoznosti pad tlaka je veći nego što bi bio za čistu vodu.

Pad tlaka dionice cjevovoda računa se kao zbroj pada tlaka uslijed trenja i lokalnog pada tlaka:

$$\Delta p = R + Z \quad (5.116)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\lambda \cdot L}{d_u} + \sum \zeta \right) \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (5.117)$$

gdje je:

R [Pa] - gubici zbog otpora strujanja u dionicama

Z [Pa] - gubici zbog lokalnih otpora strujanja

λ [-] - faktor trenja za materijal cijevi

L [m] - duljina dionice

ρ [kg/m³] - gustoća smjese vode i propilen-glikola

d_u [m] - unutarnji promjer cijevi

w [m/s] - brzina strujanja

ζ [-] - koeficijent pada tlaka zbog lokalnih otpora

Proračun faktora trenja do kojeg su došli Zigrang i Sylvester prema [14] vrijedi dovoljno točno u svim područjima turbulentnog strujanja:

$$\lambda = \left(-2 \cdot \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,7} - \frac{5,02}{Re} \cdot \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,77} - \frac{5,02}{Re} \cdot \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,77} + \frac{13}{Re} \right) \right) \right) \right)^{-2} \quad (5.118)$$

Relativna hrapavost stijenke:

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (5.119)$$

gdje je:

k [mm] - apsolutna hrapavost

d [mm] - promjer cjevovoda

Zbog pojednostavljenja koristi se i Blasiusova jednadžba koja vrijedi za područje $Re < 10^5$:

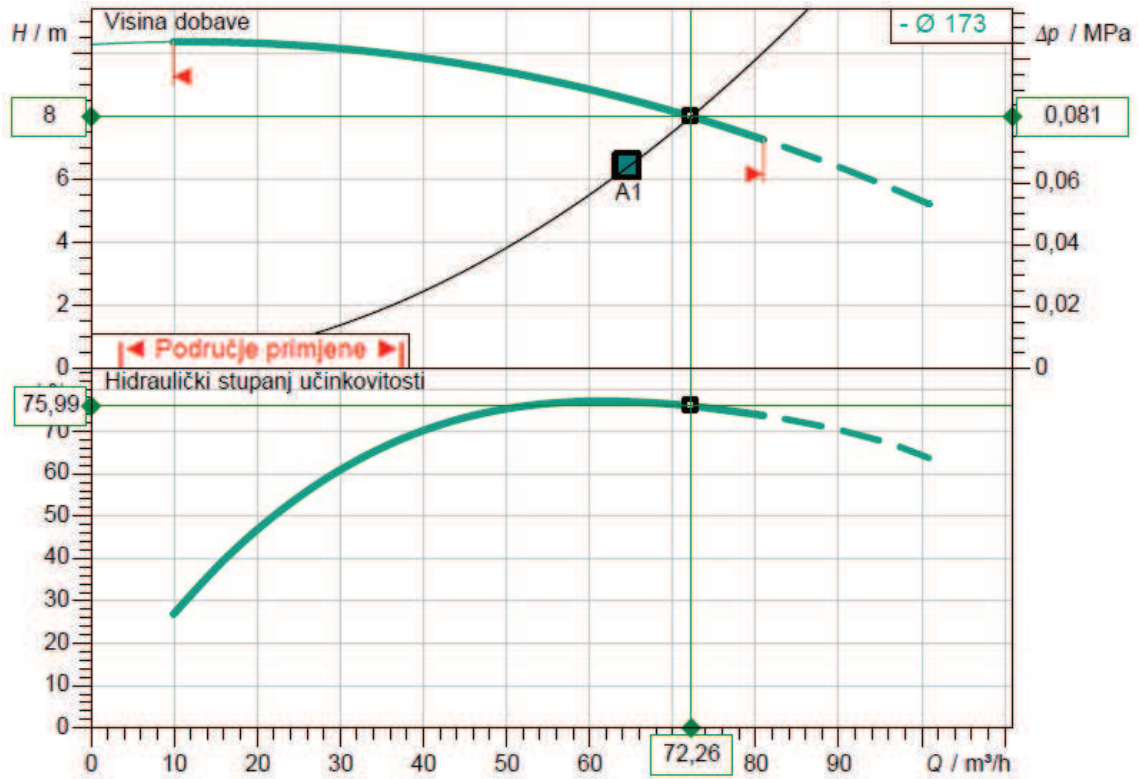
$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (5.120)$$

Rezultati proračuna cjevovoda od hladnjaka u komori 11 prikazani su u tablici 16

Tablica 16. Proračun pada tlaka u cjevovodu

Dionica (-)	Toplina (kW)	Protok (m ³ /h)	L (m)	DN (mm)	Unutarnji promjer cijevi (mm)	ξ (-)	w (m/s)	R (Pa/m)	R*L (Pa)	Z (Pa)	Ukupno R*L+Z (Pa)
1	19,2	2,94	5,4	40	41,8	3,47	0,60	203	1094	643	1737
2	38,4	5,89	17	50	53	4,52	0,74	221	3761	1297	5058
3	76,8	11,77	13,8	65	70,3	1,62	0,84	195	2688	601	3288
4	115,2	17,66	13,8	80	82,5	1,55	0,92	185	2558	682	3240
5	153,6	23,54	13,8	80	82,5	0,87	1,22	308	4252	680	4932
6	192	29,43	13,8	100	107,1	1,55	0,91	131	1811	667	2477
7	230,4	35,31	11,4	100	107,1	3,57	1,09	181	2063	2212	4275
8	422	64,68	8,8	125	131,7	3,75	1,32	196	1726	3408	5134
										Pad tlaka u hladnjaku	35000
										Ukupno	65141

Proračunom se dobiva da pad tlaka iznosi 65141 Pa, odnosno potrebna visina dobave od 6,41 metar vodenog stupca. Volumni protok iznosi 64.68 m³/h. Odabrana je cirkulacijska pumpa kao proizvod Wilo IL 80/170-2,2/4. Karakteristika ove pumpe prikazana je na slici 17.



Slika 17. Prikaz radne točke pumpe

6. SPECIFIKACIJA OPREME

Isparivač

- Rashladni učin $\Phi_0 = 300 \text{ kW}$
- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -7^\circ\text{C}$
- Temperature sekundarnog kruga $\vartheta_u/\vartheta_i = -1/-4^\circ\text{C}$
- Pločasti isparivač, propilen glikol-voda, R449A
- 0,7 x 0,5 m, 180 ploča
- Komada.....2

Kondenzator

- Učin kondenzatora $\Phi_k = 201,8 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$
- Temperatura ulaza/izlaza zraka $\vartheta_u/\vartheta_i = 32/37^\circ\text{C}$
- Hlađen zrakom, V izvedba, R449A u cijevima
- H x L x B = 1,75 x 0,12 x 7 m
- Komada.....4

Kompresor

- Rashladni učin $\Phi_0 = 148,4 \text{ kW}$
- Električna snaga $P = 50,5 \text{ kW}$
- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -7^\circ\text{C}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$
- Poluhermetički vijčani kompresor
- Kao proizvod: Bitzer HSK7461-80
- Komada.....4

Hladnjak zraka

- Rashladni učin $\Phi_0 = 19,8 \text{ kW}$
- Medij: 30% propilenglikol
- Temperatura ulaza/izlaza glikolne smjese $\vartheta_u/\vartheta_i = -4/-1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura ulaza/izlaza zraka $\vartheta_{uz}/\vartheta_{iz} = 2/0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Volumni protok $\dot{V} = 5,95 \text{ m}^3/\text{h}$
- Pad tlaka $\Delta p = 0,35 \text{ bar}$
- H x L x B = 1,26 x 2,34 x 0,975 m
- Kao proizvod: Guntner GGHN 080.2H/17-AND50/16P
- Komada.....22

Hladnjak zraka

- Rashladni učin $\Phi_0 = 16,2 \text{ kW}$
- Medij: 30% propilenglikol
- Temperatura ulaza/izlaza glikolne smjese $\vartheta_u/\vartheta_i = -4/-1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura ulaza/izlaza zraka $\vartheta_{uz}/\vartheta_{iz} = 2/0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Volumni protok $\dot{V} = 4,87 \text{ m}^3/\text{h}$
- Pad tlaka $\Delta p = 0,55 \text{ bar}$
- H x L x B = 1,26 x 2,34 x 0,975 m
- Kao proizvod: Guntner GGHN 080.2F/17-AND50/18P
- Komada.....14

Hladnjak zraka

- Rashladni učin $\Phi_0 = 14,3 \text{ kW}$
- Medij: 30% propilenglikol
- Temperatura ulaza/izlaza glikolne smjese $\vartheta_u/\vartheta_i = -4/-1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura ulaza/izlaza zraka $\vartheta_{uz}/\vartheta_{iz} = 2/0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Volumni protok $\dot{V} = 4,28 \text{ m}^3/\text{h}$

- Pad tlaka $\Delta p = 0,42 \text{ bar}$
- H x L x B = 0,76 x 2,47 x 0,835 m
- Kao proizvod: Guntner GGHN 050.2H/27-ANS50/14P
- Komada.....4

Pumpa (radna točka)

- Protok $\dot{V} = 72,26 \text{ m}^3/\text{h}$
- Visina dobave $h = 8 \text{ m}$
- Standardna pojedinačna pumpa sa suhim rotorom
- Maks. radni tlak $p = 1,6 \text{ MPa}$
- Hidraulički stupanj učinkovitosti $\eta_h = 76\%$
- Kao proizvod: Wilo 80/170-2,2/4
- Komada.....2

Sakupljač radne tvari

- Volumen $V = 320 \text{ l}$
- Kao proizvod: Bitzer FS3102N
- Komada.....2

Odvajač ulja

- Kao proizvod: Bitzer OAS3088
- Max. punjenje ulja $V = 1,5 \text{ l}$
- Volumen receiver-a $V = 30 \text{ l}$
- Komada.....2

Zaporni ventili

- Kao proizvod: Danfoss SVA 20
- Komada.....2

• Kao proizvod: Danfoss SVA 125	
Komada.....	4
• Kao proizvod: Danfoss SVA 60	
Komada.....	4
• Kao proizvod: Danfoss GBC 125	
Komada.....	2
• Kao proizvod: Danfoss GBC 55	
Komada.....	2
Nepovratni ventili	
• Kao proizvod: Danfoss CHV 64	
Komada.....	4
• Kao proizvod: Danfoss CHV 40	
Komada.....	40
Ekspanzijski ventili	
• Kao proizvod: Danfoss ETS 55	
Komada.....	2
Regulacijski ventili	
• Kao proizvod: Danfoss EVR 40	
Komada.....	40
• Kao proizvod: Danfoss EVR 20	
Komada.....	4
Hermetički filter sušač	
• Kao proizvod: Danfoss DML Eliminator	
Komada.....	2

Kontrolna stakla

- Kao proizvod: Danfoss SGP 12s 55
Komada.....2

Presostat visokog tlaka

- Kao proizvod: Danfoss KP7B
Komada.....2

Presostat niskog tlaka

- Kao proizvod: Danfoss KP35
Komada.....2

Upravljački sklop

- Kao proizvod: Danfoss EKC 202D1
Upravljač rashladnih komora
Komada.....1
- Kao proizvod: Danfoss AK-PC 772
Upravljač kondenzatora i kompresora
Komada.....2
- Kao proizvod: Danfoss EKC 202D1
Regulator pregrijavanja
Komada.....2

7. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA

Za ovaj rad odabran je indirektan (posredan) sustav hlađenja sa zrakom hlađenim kondenzatorom. U sustavu se nalaze dva kruga radne tvari R449a koji se sastoje od pločastog isparivača, zrakom hlađenog kondenzatora učinka 404 kW, poluhermetičkih vijčanih kompresora i elektroničkog ekspanzijskog ventila. Svaki krug ima rashladni učinak od 300kW. U rashladnim komorama previđeno je skladištenje jabuka na odabranoj temperaturi od 1°C.

Kondenzator je izveden u V izvedbi s 2 ventilatora koji su povezani na upravljački sustav i nalazi se na krovu građevine. Nakon kondenzatora radna tvar ulazi u sakupljač radne tvari (receiver) volumena 320 l čiji je zadatak prihvat ukapljene radne tvari iz kondenzatora za trenutačne potrebe isparivača ili prilikom popravka sustava. Zatim R449A ulazi u hermetički filter-sušač koji ima funkciju neutralizacije vlage u sustavu i filtriranje nečistoća. Kontrolno staklo postavlja se nakon filtra-sušača te nam govori, ovisno o boji indikatora, ima li vlage ili čestica prljavštine u sustavu. Sljedeći važan element sustava u kapljevinskom vodu je elektronički ekspanzijski ventil koji regulira količinu radne tvari na ulazu u isparivač pomoću regulatora, koji na temelju signala s osjetnika temperature i tlaka na izlazu iz isparivača mijenja izlazni signal, a time i protočnu površinu ventila. Ulazni signali se obrađuju u regulatoru, stoga se i može osigurati željeno pregrijanje. Prije ulaska u kompresore, na usisni vod ugrađuje se odvajač kapljevine koji skuplja kapljevinu koja eventualno nije isparila u isparivaču. Kapljevina se prikuplja da ne bi došlo do hidrauličkog udara u kompresoru. Na tlačnom vodu, na izlazu iz kompresora ugrađen je zaporni ventil, nepovratni ventil te odvajač ulja. Pomoću odvajača ulja većina ulja izbačena je u tlačni vod kompresora, vraća se natrag u kompresor. Zbog svoje izvedbe vijčani kompresori pumpaju puno ulja u sustav, pa je odvajač standardna komponenta sustava.

Posredni prijenosnik energije (smjesa propilen glikola i vode) hladi se u isparivaču radne tvari gdje temperatura glikolne smjese pada sa -1°C na -4°C. U sustavu se nalaze 22 hladionice stoga je potreban spremnik za akumulaciju mješavine propilen glikola i vode. Odabran je horizontalni spremnik volumena 6000 l. Glikolna smjesa transportira se cjevovodima do svake hladionice u kojima se nalaze hladnjaci zraka proizvođača Guntner. U hladionicama 1-11 nalaze se 2 hladnjaka zraka od kojih je svaki kapaciteta 19,8 kW, u komorama 13-19 nalaze se također 2

hladnjaka zrak od kojih je svaki kapaciteta 16,2 kW a u hladionicama 20-23 nalazi se hladnjak zraka kapaciteta 14,3 kW.

ULO tehnologija podrazumijeva skladištenje na duže vremensko razdoblje stoga je potrebno osim temperature i relativne vlažnosti, u sustavu kontrolirati i dodatne parametre kao što su koncentracija kisika (%O₂) i koncentraciju ugljičnog dioksida (%CO₂). Kao što je ranije navedeno temperatura na kojoj se jabuke skladište iznosi 1°C uz relativnu vlažnost od 90%. Razina kisika u sustavu kreće između 1,5-2,5% te 1-3% ugljičnog dioksida ovisno sorti jabuke koja se skladišti. Da bi se razina kisika održavala potrebno je hermetički zatvoriti hladionicu. Za održavanje ovih uvjeta kontrolirane atmosfere koristi se adsorber ugljičnog dioksida te generator dušika (adsorber kisika). Elektronički regulacijski aparati određuju i reguliraju optimalni sadržaj kisika i ugljičnog dioksida u prostoru. U načelu prva tri dana se vrši adsorpcija kisika, nakon čega se narednih sedam dana sustav prepušta sam sebi. Zatim se provodi adsorpcija ugljičnog dioksida te je nakon prvih deset dana koncentracija kisika na željenom minimumu. Nakon toga treba provoditi se izdvajanje ugljičnog dioksida da ne dođe do truljenja ploda.

Osnovna regulacija je temperaturna. Kada se u komori postigne zadana temperatura hlađenja, termostat javlja centralnoj regulacijskoj jedinici i ona isključuje kompresor. Kada termostat osjeti porast temperature u komori, ponovno pokreće kompresor. Na taj način se temperatura održava u zadanim granicama. Osim temperaturnog osjetnika upravljački sustav opremljen je i presostatom niskog i visokog tlaka. Kada temperatura glikolne smjese na izlazu iz isparivača padne na minimalnu vrijednost, sustav upravljanja isključuje drugi krug, odnosno kompresore drugog kruga te ako je potrebno smanjuje brzinu vrtnje elektromotora prvog kruga. Ova brzina smanjuje se do minimalno postavljene vrijednosti pri kojoj se elektronički ekspanzijski ventil zatvara i isparivač se ne napaja radnom tvari. Tlak na usisnom vodu pada do minimalne dozvoljene vrijednosti kada se presostat niskog tlaka uključuje a hlađenje prestaje. Kada temperatura smjese propline glikola i vode u isparivaču poraste do maksimalne vrijednosti, regulacija otvara elektronski ekspanzijski ventil, tlak u isparivaču se povećava, presostat niskog tlaka se gasi i hlađenje se nastavlja. Presostat visokog tlaka se uključuje u slučaju prekoračenja dozvoljenog tlaka kondenzacije. Tada se prekida napajanje strujnih krugova automatike i rad sustava se preventivno zaustavlja.

8. ZAKLJUČAK

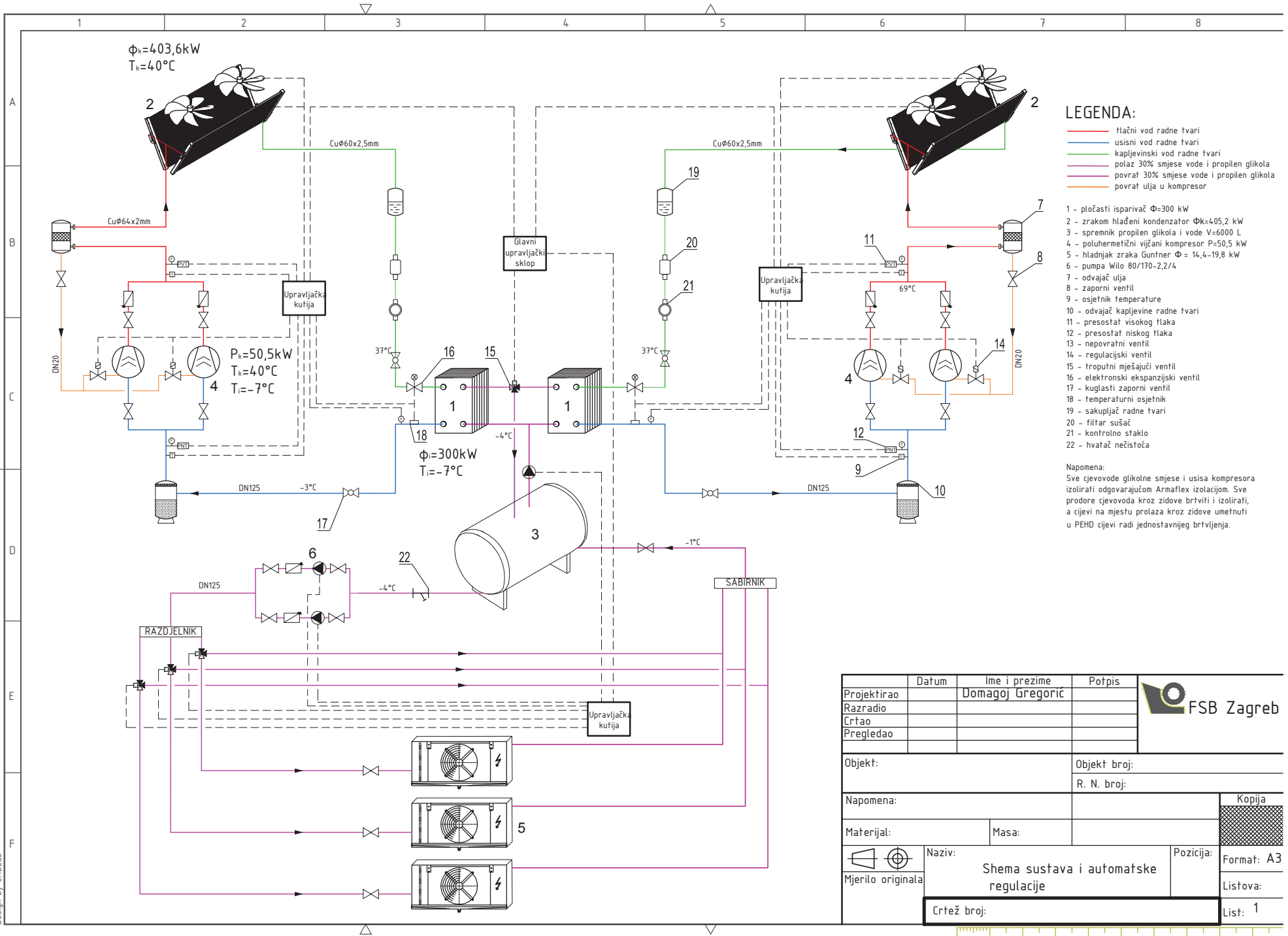
U ovom diplomskom radu izveden je projekt hlađenja prostora za skladištenje 2800 tona jabuka na duži vremenski period u uvjetima kontrolirane (ULO) atmosfere. ULO tehnologija dodatno usporava metaboličke promjene za oko 30% posebno u slučaju skladištenja jabuka, sprečava nastajanje nepovoljnih fizioloških promjena kao što su uvenulost, gubitak hranjivih sastojaka i čvrstoće mesa što rezultira duljim vijekom trajanja. U komorama se održava 1,5-2,5% kisika te 1-3% ugljičnog dioksida. Provedeni su svi aspekti projektiranja, od termodinamičkog proračuna komora, odabira rashladnog procesa do izbora opreme i proračuna cjevovoda. Prilikom dimenzioniranja uključene su i određene rezerve (sigurnost) kako bi se omogućio stabilan rad sustava u nepredviđenim uvjetima. Sustav je izveden kao indirektni s dva kruga radne tvari R449A, svaki rashladnog opterećenja od 300 kW, a kao posredni prijenosnik energije koristi se mješavina propilen glikola i vode. Oba kruga sastoje se od pločastog isparivača, dva poluhermetička vijčana kompresora, zrakom hlađenog kondenzatora u V izvedbi, elektroničkog ekspanzijskog ventila te ostalih regulacijskih i sigurnosnih elemenata koji se koriste za sigurno i učinkovito upravljanje sustavom. Sustav je automatiziran u svom radu, te osiguran od nepredviđenih radnih uvjeta.

LITERATURA

- [1] Soldo, V.: Rashladne komore, Projektiranje rashladnih sustava, Zagreb, 2017.
- [2] <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/kontrolirana-atmosfera-i-vrste-kontrolirane-atmosfere>
- [3] <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/kontrola-procesa-u-komorama-sa-kontroliranom-atmosferom#toc-mjerenje-etilena>
- [4] https://www.linde-engineering.com/en/images/HA_N_1_1_e_09_150dpi_NB_tcm19-6131.pdf
- [5] <https://bs.wikipedia.org/wiki/Jabuka>
- [6] <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/rezimi-cuvanja-voca-i-povrca-u-komorama-sa-kontroliranom-atmosferom>
- [7] <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/disanje-ubranih-plodova-voca-i-povrca>
- [8] <https://www.mbfriho.hr/ea/wp-content/uploads/2018/01/HladionickiPaneli.pdf>
- [9] ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2014
- [10] https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/Opteon/Stationary_Refrigeration/products/Opteon_XP40.html
- [11] Ciconkov, R.: Refrigeration: Solved Examples,
- [12] Soldo, V.: Hlađenje i dizalice topline, Zagreb, 2016.
- [13] VDI Heat Atlas, 2010.
- [14] Ruševljan, M.: Cjevovodi, Zagreb, 2011.
- [15] Makhnatch, Mota-Babiloni, Rogstam, Khodabandeh: Retrofit of lower GWP alternative R449A into an existing R404A indirect supermarket refrigeration system, 2016.
- [16] <https://www.agroklub.com/vocarstvo/kontrola-dozrijevanja-plodova-odredivanje-termina-berbe-jabuke/5475/>
- [17] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.

PRILOZI

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

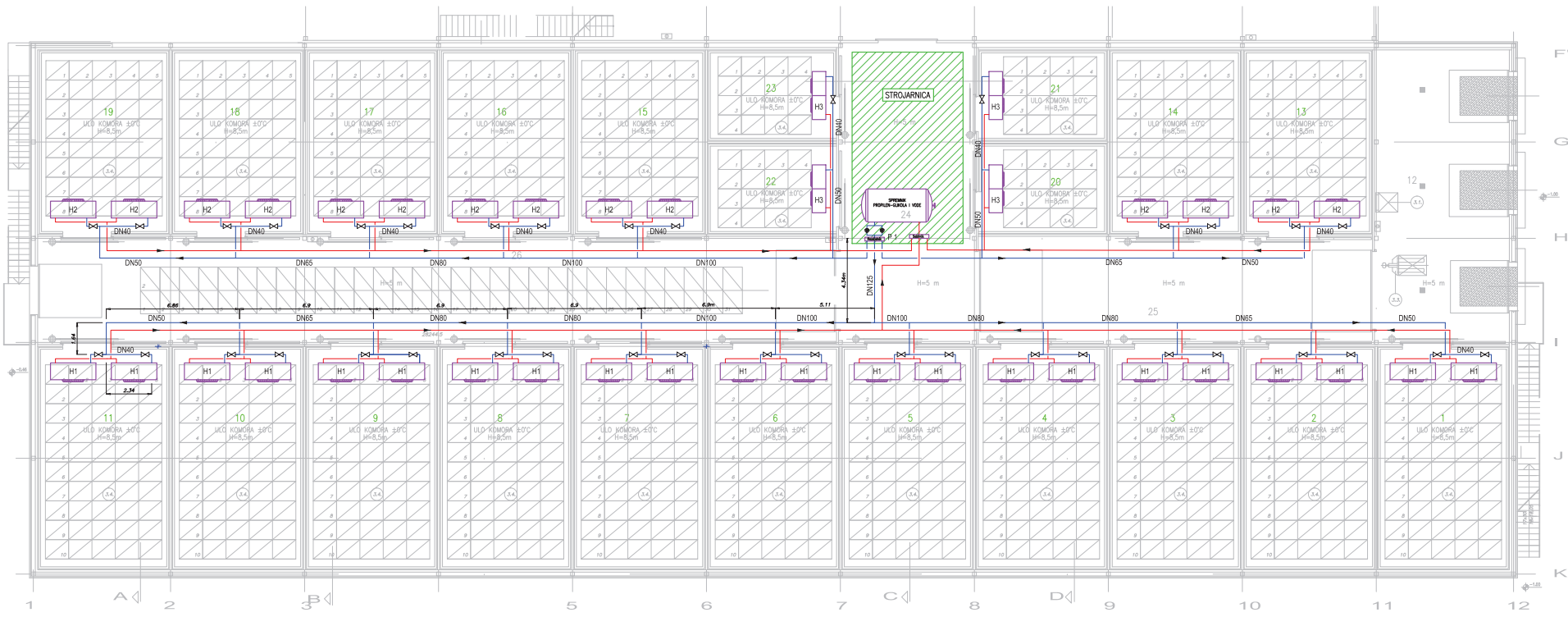


- LEGENDA:**
- hladni vod radne tvari
 - usisni vod radne tvari
 - kapljevinski vod radne tvari
 - polaz 30% smjese vode i propilen glikola
 - povrat 30% smjese vode i propilen glikola
 - povrat ulja u kompresor

- 1 - pločasti isparivač $\Phi=300$ kW
- 2 - zrakom hlađeni kondenzator $\Phi_k=405,2$ kW
- 3 - spremnik propilen glikola i vode V=6000 L
- 4 - poluhmetični vijčani kompresor P=50,5 kW
- 5 - hladnjak zraka Gunther $\Phi = 14,4-19,8$ kW
- 6 - pumpa Wilo 80/170-2,2/4
- 7 - odvajач ulja
- 8 - zaporni ventil
- 9 - osjetnik temperature
- 10 - odvajач kapljevine radne tvari
- 11 - presostat visokog tlaka
- 12 - presostat niskog tlaka
- 13 - nepovratni ventil
- 14 - regulacijski ventil
- 15 - troputni mješajući ventil
- 16 - elektronski ekspanzijski ventil
- 17 - kuglasti zaporni ventil
- 18 - temperaturni osjetnik
- 19 - sakupljač radne tvari
- 20 - filter sušač
- 21 - kontrolno staklo
- 22 - hvatač nečistoća

Napomena:
 Sve cjevovode glikolne smjese i usisa kompresora izolirati odgovarajućom Armaflex izolacijom. Sve prodore cjevovoda kroz zidove brtviti i izolirati, a cijevi na mjestu prolaza kroz zidove umetnuti u PEHD cijevi radi jednostavnijeg brtvljenja.

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio		Domagoj Gregorić		
Crtao				
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:		
Naziv:		Pozicija:		
Mjerilo originala		Format: A3		
Shema sustava i automatske regulacije				Listova:
Crtež broj:				List: 1



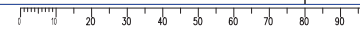
LEGENDA:

- H1 - hladnjak zraka $\Phi = 19,8 \text{ kW}$
Gunfner GGHN 080.2H/17-AND50/16P
- H2 - hladnjak zraka $\Phi = 16,2 \text{ kW}$
Gunfner GGHN 080.2H/17-AND50/16P
- H3 - hladnjak zraka $\Phi = 14,3 \text{ kW}$
Gunfner GGHN 080.2H/17-AND50/16P
- P1 - pumpa Wilo 80/170-2,2/4

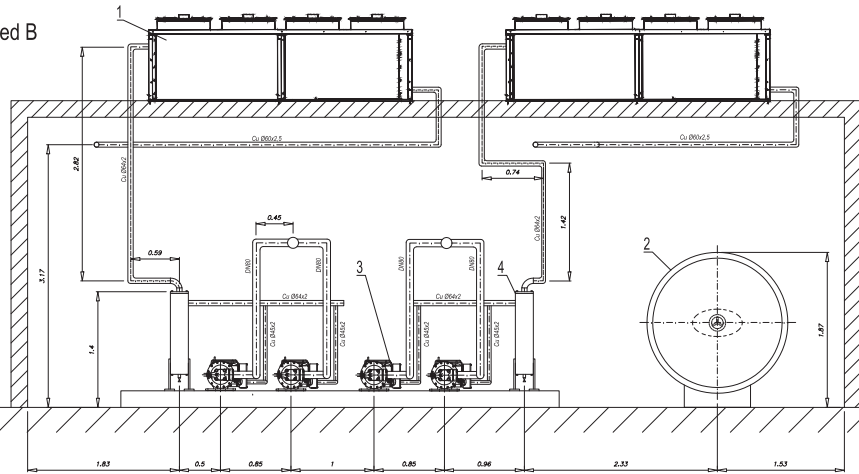
KOMORE BR.	KAPACITET KOMORE	BROJ SANDUKA	UKUPNI KAPACITET	UKUPNI BR. SANDUKA
1-11	125 t	500 kom	1.250 t	5.000 kom
13-19	125 t	400 kom	800 t	2.800 kom
20-23	49,8 t	160 kom	199,4 t	640 kom
UKUPNO HLAĐENJA			2.771,4 t	8.940 kom
RODNIK	96 t	320 kom	96 t	320 kom
UKUPNO			2.867,4 t	9.260 kom

⊗ - zaporni ventil

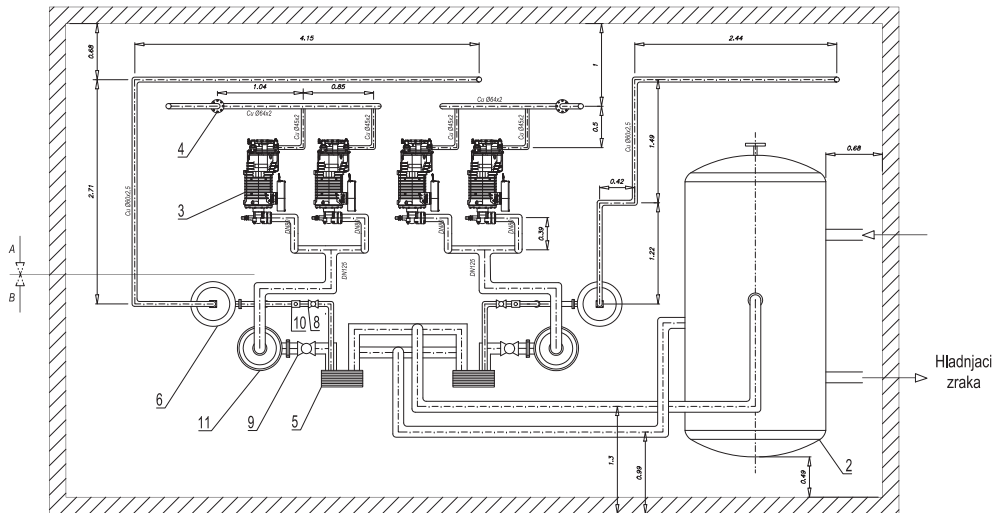
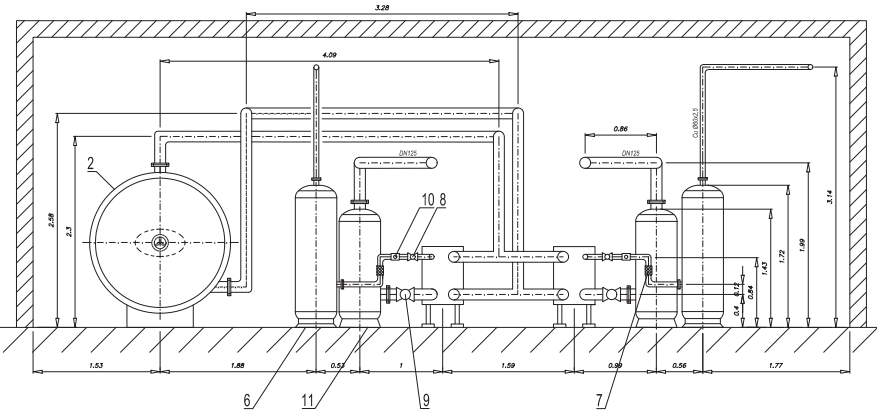
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio		Domagoj Gregorić		
Crtao				
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
Napomena:		R. N. broj:		
Materijal:	Masa:	Kopija		
Mjerilo originala	Naziv:	Dispozicijski crtež komora		Pozicija
1:150	Crtež broj:	Format: A2		
		Listova:		
		List: 2		



Pogled B



Pogled A



LEGENDA:

- 1 - kondenzator hlađen zrakom V-izvedba
- 2 - spremnik glikolne smjese V=6000 l
- 3 - poluhermetički vijčani kompresor
- 4 - odvajač ulja
- 5 - pločasti isparivač
- 6 - sakupljač radne tvari
- 7 - filter sušač
- 8 - kuglasti zaporni ventil
- 9 - kuglasti zaporni ventil
- 10 - ogledno staklo
- 11 - odvajač kapljevine RT

Naziv dijela	Kom.	Crtež broj	Materijal	Sirove dimenzije	Masa
		Norma	Potpis		
Projektirao:		ime i prezime			
Razradio:		domagor Gregoric			
Crtao:					
Provedao:					
Objekt:		Objekt broj:			
Napomena:		R. N. broj:			
Materijal:		Masa:			
Hrvatska originalna		Naziv:		Format: A1	
		Dispozicijski crtež strojarne		Listova: 3	
		Crtež broj:			