

**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Transportinės eutektikos šaldymo sistemos tyrimas su R290 šaldymo agentu**

Baigiamasis magistro projektas

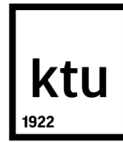
---

**Lukas Prakopavičius**  
Projekto autorius

**doc. Liutauras Vaitkus**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Transportinės eutektikos šaldymo sistemos su R290 (propanas) šaldymo agentu tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

**Termoinžinerija (6211EX023)**

---

**Lukas Prakopavičius**  
Projekto autorius

**doc. Liutauras Vaitkus**  
Vadovas

**doc. Algimantas Balčius**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lukas Prakopavičius

## **Transportinės eutektikos šaldymo sistemos su R290 (propanas) šaldymo agentu tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, **Luko Prakopavičiaus**, baigiamasis projektas tema „**Transportinės eutektikos šaldymo sistemos su R290 (propanas) šaldymo agentu tyrimas**“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

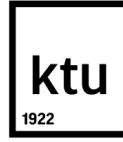
Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

---

(parašas)



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Studijų programa – Termoinžinerija (6211EX023)

## **Magistro studijų baigiamojo projekto užduotis**

**Studentui** – Lukui Prakopavičiui

### **1. Baigiamojo projekto tema –**

Transportinės eutektikos šaldymo sistemos su R290 šaldymo agentu tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

The Research of Transport Eutectic Refrigerating System with Refrigerant R290 (Propane)

*(Anglų kalba)*

### **2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –**

Apžvelgti pagrindines natūralių šaldymo agentų termodinamines, aplinkosaugines bei saugumo savybes. Sudaryti dozės minimizavimo matematinį modelį dvifaziam srautui, atlikti teorinį dozės skaičiavimą šaldymo sistemai. Pateikti ir išanalizuoti bandymų rezultatus. Pateikti išvadas.

### **3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –**

Transportinis (iki 3,5t) šaldytuvas su eutektine šaldymo sistema (5 eutektinės plokštės); nominalios sąlygos, kai aplinkos temperatūra 20°C; aukštų temperatūrų sąlyga, kai aplinkos temperatūra 38°C; šaldymo agentas – R290 (propanas).

### **4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –**

Darbas turi atitikti baigiamiesiems darbams keliamus apiforminimo ir struktūros reikalavimus.

Projekto autorius

Lukas Prakopavičius

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

2019-02-12

*(data)*

Baigiamojo projekto vadovas

Liutauras Vaitkus

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

2019-02-12

*(data)*

Krypties studijų programos vadovas

Algimantas Balčius

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

2019-02-14

*(data)*

Prakopavičius, Lukas. Transportinės eutektikos šaldymo sistemos su R290 (propanas) šaldymo agentu tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Liutauras Vaitkus; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų krypčių grupė), studijų kryptis: energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: transportinis šaldytuvas, eutektinė šaldymo sistema, propanas, degumas, šaldymo agento dozė.

Kaunas, 2019. 61 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe analizuojama transportinė eutektinė šaldymo sistema su R290 šaldymo agentu. Eutektinėse šaldymo sistemose šilumai absorbuoti panaudojama fazinę būseną keičianti medžiaga - eutektinis skystis, įprastai laikomas eutektinėse plokštėse. R290 neturi ozono ardymo potencialo, o jo visuotinio atšilimo potencialas labai žemas, todėl tai yra ypač patrauklus šaldymo agentas atsižvelgiant į vis griežtėjančius aplinkosauginius reikalavimus. Kita vertus, propanas yra degus ir priklauso A3 agentų grupei. Dėl šios priežasties galioja papildomi į sistemą leidžiamos pildyti dozės reikalavimai. Pagal IEC 60335-2-89, maksimali leidžiama degių šaldymo agentų dozė komercinėse sistemose šiuo metu yra 150g, tačiau numatoma šia ribą pakeisti į 500g. Būtent todėl šio darbo pagrindinis skaičiavimų tikslas – nustatyti tiriamosios eutektinės šaldymo sistemos maksimalią šaldymo agento dozę. Pritaikius matematinį modelį dvifaziam srautui panaudojant Premoli koreliaciją gauta, kad tiek nominaliomis, tiek maksimaliomis, kai aplinkos temperatūra lygi 38°C, sąlygomis, apskaičiuota preliminari šaldymo agento dozė viršija 500g ribą ir siekia 750g. Kaip alternatyva propanui buvo apskaičiuota ir sistema su propilenu (R1270) – gauti rezultatai panašūs propaninei sistemai. Taigi, tokiai sistemai reikalinga tolimesnė dozės optimizacija.

Taip pat analizuojant sistemą atlikti ir atšaldymo bei elektros energijos suvartojimo bandymai. Gauta, kad sistema –20°C iki –33°C atšaldo per 4,5 val. Atitinkamai, kai aplinkos temperatūra yra 20°C, šiam atšaldymo laikui pasiekti sunaudojama beveik 6 kWh elektros energijos.

Prakopavičius, Lukas. The Research of Transport Eutectic Refrigerating System with Refrigerant R290 (propane). Master's Final Project / doc. dr. Liutauras Vaitkus; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Energy Engineering

Key words: transport refrigerator, eutectic refrigeration system, propane, flammability, refrigerant charge.

Kaunas, 2019. 61 p.

### Summary

In this paper, eutectic transport refrigeration system with R290 (propane) is analyzed. In eutectic refrigeration systems phase-change material (eutectic liquid) is used to absorb heat from the refrigerated compartment. Due to the fact that propane has almost no global warming potential and no ozone depletion potential, it is held in high regard when the ever more demanding environmental requirements are considered. On the other hand, propane and other hydrocarbon refrigerants are flammable and considered to be class A3 refrigerants. For this reason, additional requirements and safety regulations are put into effect which mainly limit the allowed refrigerant charge in the system. According to IEC 60335-2-89, the maximum allowed hydrocarbon refrigerant charge in a commercial refrigeration system currently is 150g, though this limit is expected to rise to 500g soon. The main aim of the calculations provided in this paper is to determine whether the analyzed transport propane refrigeration system can meet these requirements. To achieve this, a mathematical model for two-phase flow with Premoli correlation for slip ratio was used. The results showed that regardless of ambient temperature, the charge in the system exceeds the 500g limit and is close to 750g. As an alternative to propane, propylene was also analyzed – results were similar to propane. This means that these systems need further charge optimization.

In addition to charge calculations, experiments to determine pull-down times and energy consumption were also carried out. The results showed, that the propane system can perform a pull-down from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $-33^{\circ}\text{C}$  in 4.5 hours and consume almost 6 kWh of electricity (when the ambient temperature is equal to  $20^{\circ}\text{C}$ ).

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>17</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>18</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Teorinė dalis</b> .....	<b>11</b>
1.1. Šaldymo agentai bei aplinkosauginiai aspektai .....	11
1.2. Propanas kaip šaldymo agentas (R290) .....	12
1.3. Saugumo charakteristikos .....	14
1.4. Šaldymo agento dozės pasiskirstymas bei masės matavimas.....	15
1.5. Šaldymo agento dozės skaičiavimas .....	17
1.6. Eutektinė šaldymo sistema.....	19
<b>2. Skaičiuojamoji dalis</b> .....	<b>24</b>
2.1. Dozės skaičiavimas sistemai su R507A agentu (nominalios sąlygos).....	24
2.1.1. R507A dozė garintuve .....	24
2.1.2. R507A dozė kondensatoriuje .....	31
2.2. Dozės skaičiavimas sistemai su R290 (nominalios sąlygos).....	33
2.2.1. R290 dozė garintuve .....	34
2.2.2. R290 dozė kondensatoriuje .....	36
2.2.3. R290 dozė resiveryje .....	38
2.2.4. R290 dozė skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose .....	40
2.3. R290 dozės perskaičiavimas (maksimalios sąlygos).....	40
2.3.1. R290 dozės garintuve perskaičiavimas .....	40
2.3.2. R290 dozės kondensatoriuje perskaičiavimas .....	42
2.3.3. R290 dozės resiveryje perskaičiavimas .....	44
2.3.4. R290 dozės skysčio linijoje perskaičiavimas.....	44
2.4. Propilenas (R1270) kaip alternatyva propanui (R290) .....	44
2.4.1. R1270 dozė garintuve .....	45
2.4.2. R1270 dozė kondensatoriuje .....	46
2.4.3. R1270 dozė resiveryje .....	48
2.4.4. R1270 dozė skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose .....	48
2.5. Propileno (R1270) dozės perskaičiavimas (maksimalios sąlygos) .....	48
2.5.1. R1270 dozės garintuve perskaičiavimas .....	48
2.5.2. R1270 dozės kondensatoriuje perskaičiavimas .....	50
2.5.3. R1270 dozės resiveryje perskaičiavimas .....	52
2.5.4. R1270 dozės perskaičiavimas skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose .....	52
2.6. Skaičiavimo rezultatų apibendrinimas .....	52
<b>3. Eksperimentinė dalis</b> .....	<b>54</b>
3.1. Šaldytuvo bandymai su propanu (R290) .....	56
3.2. Šaldytuvo bandymai su propilenu (R1270) .....	58
<b>Išvados</b> .....	<b>60</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>61</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1.1 lentelė.</b> Šaldymo agentų fizikinės ir aplinkosauginės savybės.....	13
<b>1.2 lentelė.</b> Šaldymo agentų termofizikinės savybės. ....	13
<b>1.3 lentelė.</b> R290 saugumo charakteristikos.....	14
<b>1.4 lentelė.</b> ES lygmens standartų sąrašas.....	15
<b>2.1 lentelė.</b> Regresijos koeficientai .....	27
<b>2.2 lentelė.</b> Kondensacijos diapazono parametrai (R507A).....	33
<b>2.3 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (1).....	35
<b>2.4 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (2).....	35
<b>2.5 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (3).....	36
<b>2.6 lentelė.</b> Kondensacijos diapazono parametrai (R290).....	38
<b>2.7 lentelė.</b> Pagrindiniai R290 parametrai, kai kondensacijos temperatūra 55°C, MOP 2bar.....	41
<b>2.8 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (1) .....	41
<b>2.9 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (2) .....	41
<b>2.10 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (3) .....	41
<b>2.11 lentelė.</b> Pagrindiniai R290 parametrai.....	42
<b>2.12 lentelė.</b> Kondensacijos diapazono parametrai (R290).....	43
<b>2.13 lentelė.</b> Būsenos taškų parametrai (R1270).....	45
<b>2.14 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai R1270 (1) .....	46
<b>2.15 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai R1270 (2) .....	46
<b>2.16 lentelė.</b> Koreliacijos parametrai R1270 (3) .....	46
<b>2.17 lentelė.</b> Garo ir skysčio parametrai R1270.....	46
<b>2.18 lentelė.</b> Kondensacijos diapazono parametrai R1270 .....	47
<b>2.19 lentelė.</b> R1270 parametrai .....	49
<b>2.20 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (1) .....	49
<b>2.21 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (2) .....	49
<b>2.22 lentelė.</b> Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (3) .....	49
<b>2.23 lentelė.</b> Pagrindiniai R1270 parametrai.....	50
<b>2.24 lentelė.</b> Perskaičiuoti kondensacijos diapazono parametrai (R1270).....	51
<b>2.25 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatų suvestinė .....	52



## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Propano (R290) užsidegimo ribos.....	14
<b>1.2 pav.</b> Eutektinė šaldymo sistema.....	20
<b>1.3 pav.</b> Atšaldymo pradžios p-h diagrama (38 °C aplinkos temperatūra).....	20
<b>1.4 pav.</b> Supaprastinta tradicinės eutektinės sistemos schema.....	21
<b>1.5 pav.</b> Sistemos su EEV ciklas (aplinkos temperatūra 38 °C).....	21
<b>1.6 pav.</b> Sistemos veikimas esant nominaliomis sąlygomis (brūkšniuota linija).....	22
<b>2.1 pav.</b> R507A šaldymo ciklas (nominalios sąlygos).....	26
<b>2.2 pav.</b> SELECT programos langas. Standartinės sąlygos.....	27
<b>2.3 pav.</b> ECO kondensatoriaus modelis. Izometrinis vaizdas.....	31
<b>2.4 pav.</b> R290 šaldymo ciklas (nominalios sąlygos).....	35
<b>2.5 pav.</b> R1270 šaldymo ciklas (nominalios sąlygos).....	45
<b>3.1 pav.</b> Sistemos su R290 atšaldymas nuo –20°C.....	56
<b>3.2 pav.</b> Sistemos su R290 bandymų grafikas.....	57
<b>3.3 pav.</b> R290 sistemos atšaldymo laiko ir elektros energijos priklausomybė nuo aplinkos temperatūros.....	57
<b>3.4 pav.</b> Sistemos su R1270 atšaldymas nuo -20°C.....	58
<b>3.5 pav.</b> R1270 sistemos atšaldymo laiko ir elektros energijos priklausomybė nuo aplinkos temperatūros.....	59

## Ivadas

Griežtėjant su aplinkosauga susijusiems reikalavimams, natūralių šaltnešių naudojimas atrodo vis patrauklesnis dėl itin mažo visuotinio atšilimo potencialo bei neegzistuojančio ozono sluoksnio ardymo potencialo. Deja susiduriama su problema – didžioji dalis šių šaldymo agentų priklauso A3 grupei, t.y. jie yra degūs. Dėl šių priežasčių įsigalioja papildomi reikalavimai, daugiausiai susiję su šaltnešių dozės sistemoje apribojimu, o tai žinoma riboja ir šaldymo sistemų galimybes pasiekti norimą šaldymo našumą bei sistemos efektyvumą. Dozės apribojimų reikalavimuose numatomi pakeitimai komercinėms šaldymo sistemoms – maksimali šaldymo agento dozė bus padidinta iki 500g (dabartiniuose reikalavimuose nurodyta dozė – 150g).

Šio projekto tikslas – išanalizuoti transportinio šaldytuvo su eutektine šaldymo sistema veikimą su R290 šaldymo agentu. Tiriamasis objektas – transportinis šaldytuvas su eutektine šaldymo sistema. Pagrindiniai uždaviniai – teorinėje dalyje apžvelgti pagrindines propano (R290) šaldymo agento termodinamines, saugumo bei aplinkosaugines savybes, išanalizuoti galiojančius bei ateityje numatomus leidžiamos A3 grupės šaldymo agentų dozės sistemoje reikalavimus. Apžvelgti dozės skaičiavimui naudojamą metodiką ir Premoli koreliaciją slydimo santykiui. Aprašyti transportinio šaldytuvo eutektinės šaldymo sistemos veikimo principus.

Praktinėje dalyje atliekami šaldymo agento dozės skaičiavimai įvertinant tiek nominalias sąlygas, tiek aukštos aplinkos temperatūros sąlygas. Palyginimui su propanu apskaičiuojama ir R1270 (propileno) dozė. Gauti rezultatai apibendrinami ir įvertinama ar tiriama transportinė šaldymo sistema tenkintų dozės reikalavimus.

Šaldymo agento dozės apskaičiavimui panaudota jau minėta Premoli koreliacija slydimo santykiui. Skaičiavimai atlikti MATLAB 2016b programine įranga. Šaldymo agentų parametrai gauti iš REFPROP 9.1 duomenų bazės, o šaldymo ciklai braižyti ir su REFPROP 9.1, ir su CoolPack 1.50 programomis.

Eksperimentinėje darbo dalyje pateikiamas detalus transportiniams šaldytuvams dažniausiai atliekamų bandymų aprašymas. Nurodoma bandymų metodika bei naudojama eksperimentinė įranga. Išanalizuojami grafiškai pateikti transportinio šaldytuvo bandymų metu gauti rezultatai, pateikiamos išvados.

## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Šaldymo agentai bei aplinkosauginiai aspektai

Po įvairių sunkumų, atsiradusių dėl natūralių šaldymo agentų naudojimo (pavyzdžiui degumas), atsiradus chlorfluorangliavandenilinio (CFC) bei hidrochlorfluorangliavandenilinio (HCFC) šaldymo agentams šaldymo pramonė atsigavo. Nuo pat CFC ir HCFC pristatymo 1930 m., jų naudojimas vis augo. Pagrindinės to priežastys – puikios termofizikinės savybės bei eksploatacinis saugumas. Tačiau 1974 m. atlikti tyrimai parodė, kad šie agentai atsakingi už ozono sluoksnio irimą. Į tai atsižvelgus, 1987 m. Monrealyje buvo priimtas CFC ir HCFC šaldymo agentų naudojimo mažinimo ir kartu atsisakymo susitarimas.

Tai tapo ypatingai svarbiu faktoriumi komercinėms šaldymo ir oro kondicionavimo sistemoms. Anksčiau tokiose sistemose pagrindiniais šaldymo agentais buvo ozono sluoksnį ardantys R12, R22, R502, specializuotam pritaikymui – R114, R12B1, R13B1, R13 ir R503. Šių medžiagų naudojimas daugelyje pramoninių šalių jau visiškai uždraustas, nors galimybė naudoti R22 buvo pratęsta. Vis dėlto Europos Sąjunga įsipareigojo palaipsniui uždrausti ir R22, anksčiau laiko.

Praėjus kuriam laikui, po to kai chloro neturintys HFC agentai (R134a, R404A, R407C, R507A bei R410A) įsitvirtino pramoninių šaldymo sistemų bei oro kondicionavimo rinkoje, aptikta dar viena aplinkosauginė problema – visuotinis klimato atšilimas. Klimato kaita bei vidutinės žemės atmosferos temperatūros didėjimas – visa tai yra visuotinio atšilimo rimtos pasekmės. Nors hidrofluorangliavandeniliai ir turi žemesnį ozono ardymo potencialą, jų visuotinio atšilimo potencialas (VAP) yra didesnis. Dėl šių priežasčių atsirado naujų, aplinkai nekenksmingų, tačiau energiją taupančių šaltnešių poreikis.

Atidžiau vertinant anksčiau naudotų CFC, HCFC bei HFC šaltnešių pakaitalus, galimybės naudoti tik vieną medžiagą yra ganėtinai ribotos. Galima paminėti R134a, kurio VAP palyginti visai nedidelis. Panaši situacija ir su hidrofluorolefinais (HFO) R1234yf ir R1234ze (E) (VAP <10). Šie agentai taip pat neįtraukiami į F-dujų reglamentus.

Tokiems agentams ieškant tiesioginės didesnio tūrinio šalčio našumo alternatyvos (paremtos fluorintais angliavandeniliais) galima išskirti tik šaltnešių mišinius. Tačiau, atsižvelgiant į termodinamines savybes, degumą, toksiškumą bei visuotinio atšilimo potencialą, galimų kandidatų sąrašas yra ganėtinai ribotas. Prie tokių agentų priskiriami R134a, R1234yf, R1234ze(E), R32, R125 and R152a.

Visi HFO šaldymo agentai priklauso šiltnamio efektą sukeliančių dujų kategorijai. Šių dujų emisijos daro įtaką visuotiniam atšilimui. Verta paminėti, kad ši įtaka daug didesnė, nei CO<sub>2</sub> dujų, kurios yra pagrindinės šiltnamio efektą sukeliančios dujos atmosferoje (kartu su vandens garu). Per 100 metų, 1kg R134 emisijos apytikriai atitinka 1430 kg CO<sub>2</sub> (VAP = 1430).

Atsiranda vis kitokių priemonių norint sumažinti šių dujų emisijas. Viena jų – priimami nauji teisiniai reglamentai. Nuo 2007 m. Europos Sąjungoje įsigaliojo „Reglamentas dėl tam tikrų fluorintų šiltnamio efektą sukeliančių dujų“, nusakantis griežtus reikalavimus šaldymo bei oro kondicionavimo sistemoms. Taip pat nuo 2015 m. įsigaliojo atnaujintas No. 517/2014 reglamentas bei eilė kitų jau

ratifikuotų reglamentų. Panašūs reglamentai jau įsigalioję arba ruošiami ir Australijoje, Kanadoje, JAV.

Kalbant apie tarptautinius susitarimus, 2016 m. pagal Monrealio protokolą buvo priimtas „Kigali pakeitimas“, kuriame nuo 2019 m. susitarta dėl laipsniško HFC agentų naudojimo mažinimo.

Nors netiesioginės energijos gamybos emisijos yra žymiau didesnės nei tiesioginės dėl HFC šaldymo agentų (CO<sub>2</sub> - ekvivalentas), laikui bėgant šaltnešiams, turintys aukštą visuotinio atšilimo potencialą (VAP) bus ir jau yra taikomi griežti apribojimai ir draudimai. Tai jau paveikė R404A ir R507A, kuriems siūlomos alternatyvos su mažesniu VAP. Tačiau norint pasiekti teisinius tikslus, reikės papildomų šaldymo agentų pakaitalų ir didesnio natūralių medžiagų (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, hidrokarbonų) naudojimo.

## 1.2. Propanas kaip šaldymo agentas (R290)

Keletą pastarųjų dešimtmečių, degių šaldymo agentų (šiuo atveju hidrokarbonų) naudojimas įprastinėse šaldymo bei oro kondicionavimo sistemos buvo visiškai uždraustas dėl potencialiai atsirandančios saugumo rizikos. Pavyzdžiui propanas – nors 1920 m. buvo laikomas bekvapiu, visiškai saugiu bei pasižyminčiu puikiomis termofizikinėmis savybėmis šaldymo agentu, po CFC ir HCFC atsiradimo 1928 m. šis šaltnešis tapo nebeatraukliu dėl jo degumo. Vis dėlto, dėl aplinkosauginių priežasčių bei po padarytos didelės pažangos šaldymo sistemų technologijose, propanas vėl tampa patraukliu pakaitalu seniesiems šaldymo agentams.

Su propanu bei jo mišiniu atlikti įvairūs tyrimai. Devotta analizavo galimybę pakeisti R22 propanu oro kondicionavimo sistemose. Rezultatai parodė, kad šaldymo našumas bei energijos suvartojimas sistemoje su R290 buvo atitinkamai nuo 6,6% iki 9,7% ir 12,4% iki 13,5 % žemesnis, o COP didesnis nuo 2,8% iki 7,9%. Purkayastha ir Bansal'is [1] išanalizavo 15kW šilumos siurblių su R290 – gauti rezultatai parodė, kad lyginant su R22, R290 COP padidėja beveik 20%, tačiau šaldymo našumas sumažėja maždaug 16%.

Cheng'as [2] tyrinėjo propano, propileno, izobutano mišinius šilumos siurblyje. Gauti rezultatai vėlgi parodė, kad tiek šaldymo, tiek šildymo našumas yra šiek tiek mažesnis, tačiau COP didesnis nei R22.

Norint pagerinti našumą, propanas taip pat gali būti tiekiamas ir kaip mišinys su izobutanu (R600a) ir etanu (R170). Gryno izobutano pagrindinė paskirtis – pakeisti R12 mažose sistemose.

Kaip jau minėta, ozono ardymo potencialas (OAP), visuotinio atšilimo potencialas (VAP) bei atmosferinė gyvavimo trukmė yra itin svarbūs dydžiai, parodantys šaldymo agento daromą įtaką atmosferai, kai jis patenka į aplinką. OAP turi normalizuotą reikšmę, atitinkančią 1,0 R11 šaldymo agentui. VAP parodo dėl šiltnamio efektą sukeliančių dujų atsirandantį klimato atšilimo potencialą. Atmosferinė gyvavimo trukmė parodo kiek vidutiniškai šaldymo agentas gali egzistuoti atmosferoje iki kol pilnai suyra. Lentelėje 1.1 pateiktos fizikinės ir aplinkosauginės propano, propileno ir izobutano savybės (palyginimui įtrauktas ir R507A).

**1.1 lentelė.** Šaldymo agentų fizikinės ir aplinkosauginės savybės.

Žymėjimas	Cheminė formulė	M kg/kmol	$t_0$ °C	$t_{kr}$ °C	$p_{kr}$ bar	Temp. slydimas	Saugumo grupė	VAP
R507A	R143/125 (50/50)	98,86	-47,1	70,75	37,2	0	A1	4000
R600a	$CH(CH_3)_3$	58,12	-11,6	134,66	36,29	0	A3	20
R290	$C_3H_8$	44,1	-42,11	96,74	42,51	0	A3	20
R1270	$C_3H_6$	42,08	-47,62	91,06	45,55	0	A3	20

R290 neturi ozono ardymo potencialo, o jo visuotinio atšilimo potencialas labai žemas. Vis dėlto, norint įvertinti šaldymo agento poveikį aplinkai naudojamas suminis ekvivalentinis šiltėjimo indeksas (TEWI – total equivalent warming index) [3]. Šis dydis susideda iš tiesioginę įtaką aplinkai darančių faktorių dėl nutekėjimo ir netiesioginio dėl energijos suvartojimo dirbant šaldymo sistemai. Propanas taip pat pasižymi puikiais termofizikinėmis savybėmis, todėl tiek tiesioginis, tiek netiesioginis poveikis aplinkai yra ganėtinai mažas.

**1.2 lentelė.** Šaldymo agentų termofizikinės savybės.

Šaldymo agentas	Būsena	Temperatūra	$\rho$ ( $m^3/kg$ )	$\nu$ ( $\mu Pa \cdot s$ )	$\lambda$ ( $mW/mK$ )
R290	Garas	27°C	21,7	8,3	19,7
		55°C	43,7	9,7	24,7
	Skystis	27°C	489,2	92,8	95,1
		55°C	438,8	80,5	69,8
R1270	Garas	27°C	25,7	9,0	19,1
		55°C	51,9	10,9	26,7
	Skystis	27°C	502,8	94,1	111,8
		55°C	446,2	70,1	98,3
R507A	Garas	27°C	73,1	12,4	16,3
		55°C	173,1	15,6	24,7
	Skystis	27°C	1038,0	123,3	61,6
		55°C	856,2	76,4	51,2

Termofizikinės šaldymo agento savybės įtakoja energinį efektyvumą šaldymo sistemoje. Lentelėje 3, pasitelkus REFPROP 9.1 pasiekama „NIST Standard Reference Database“ šaldymo agentų parametrų duomenų baze [4], surašytos pagrindinės termofizikinės savybės, esant skirtingoms temperatūroms (atitinkamai 27°C ir 55°C). Nedidelis propano (R290) tankis (lyginant su R507A) skystoje ir garų būsenoje atspindi mažesnius šio šaldymo agento dozės reikalavimus, todėl mažėja trintis bei didėja šilumos perdavimo koeficientas tiek garintuve, tiek kondensatoriuje. Šaldymo agento klampumas yra viena iš pagrindinių negrįžtamumo priežasčių ir tiesiogiai įtakoja kondensacijos ir virimo šilumos perdavimo koeficientus. R290 pasižymi nemažu klampumu ir šiluminiu laidumu, o tai pagerina kondensatoriaus ir garintuvo efektyvumą. Dėl gan didelės specifinės šilumos, R290 duoda žemesnę išmetimo temperatūrą.

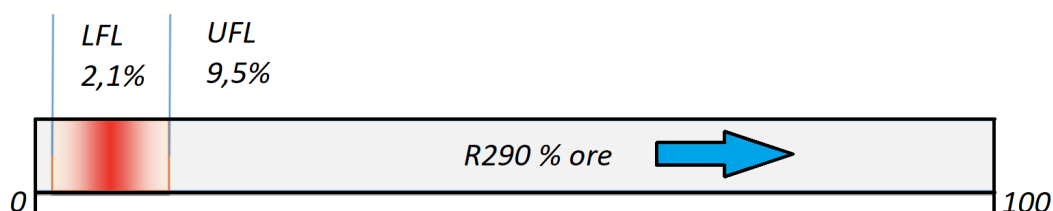
### 1.3. Saugumo charakteristikos

Pagal ASHRAE 34-ą standartą, R290 klasifikuojamas kaip A3 šaldymo agentas, o tai reiškia, kad šis agentas yra netoksiškas, tačiau ypač degus. Keletas charakteristikų, susijusių su degumu, aprašyta 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. R290 saugumo charakteristikos

LFL pagal masę, ( $kg/m^3$ )	LFL pagal tūrį, %	Degimo šiluma, ( $kJ/kg$ )	Degimo greitis, ( $m/s$ )	Užsidegimo temperatūra, $^{\circ}C$	Užsidegimo energija, ( $J$ )	Toksiškumas, (ppm)
0,038	2,1	50500	>0,4	466	0,00025	1000

Žemutinė degumo riba (angl. lower flammability limit - LFL) nurodo žemiausią šaldymo agento koncentraciją ore, kuriai esant jis vis dar dega tam tikromis sąlygomis. Pagal ASHRAE 15 standartą, esant nutekėjimui, R290 negali viršyti 20 % reikšmės. Degimo šiluma nurodo, kiek šilumos išskiriama vykstant degimui.



1.1 pav. Propano (R290) užsidegimo ribos

Propano (R290) degumas daugeliui kelia didelį susirūpinimą. Tačiau reikia įvertinti tai, kad šis agentas, kontaktuodamas su oru, spontaniškai neužsidega. Tam, kad įvyktų degimas, reikalingos gana specifinės sąlygos – agentas turi susimaišyti su oru tam tikru santykiu bei patalpoje turi būti šilumos (liepsnos) šaltinis, kurio energija didesnė nei  $2.5 \cdot 10^{-4} kJ$  arba paviršiaus temperatūra didesnė nei  $440^{\circ}C$ . Jei vis dėlto degimas įvyksta, R290 liepsna plinta apytiksliai  $460 m/s$  greičiu.

Tokiu atveju, kai R290 koncentracija ore mažesnė nei 2,1% ( $0,038 kg/m^3$ ), užsidegimui „kuro“ nepakanka. Kita vertus, jeigu R290 koncentracija ore didesnė nei 9,5% ( $0,177 kg/m^3$ ), užsidegimui paprasčiausiai trūksta deguonies.

Būtent dėl šių priežasčių, tam, kad R290 būtų galima naudoti saugiai, reikalinga imtis tam tikrų atsargumo priemonių, galiojančių tiek propanui, tiek kitiems A3 klasės šaldymo agentams. Sistemose turi būti užtikrintas hermetiškumas, kuo mažesnė agento dozė, tinkama ventiliacija.

Projektuojant šaldymo sistemą privaloma įvertinti leidžiamą šaldymo agento dozę pagal galiojančius standartus. Lentelėje nurodyti pagrindiniai standartai, aprašantys degių šaldymo agentų naudojimą įvairiose sistemose [5].

#### 1.4 lentelė. ES lygmens standartų sąrašas

Standartas	Pavadinimas	Leidžiama dozė	Numatomi pokyčiai
IEC 60335-2-40	Elektrinių šilumokaičių, oro kondicionierių ir sausintuvų saugos reikalavimai.	A2L: - A3: 1 kg	A2L: ±80 kg A3: 1 kg
IEC 60335-2-89	Komercinių šaldymo sistemų saugos reikalavimai.	A2L: 150 g A3: 150 g	A2L: ±1,2 kg A3: ±0,5 kg
IEC 60335-2-24	Buitinių ir panašios paskirties elektrinių prietaisų saugos reikalavimai.	A2L: 150 g A3: 150 g	Pokyčiai nenumatomi
ISO5149 ir EN378	Šaldymo sistemos ir šilumos siurbiai. Aplinkosauginiai reikalavimai.	A2L: 39 x LFL A3: ±1 kg	A2L: 60–80 kg A3: -

Atsižvelgiant į šaldymo agento dozės ribojimus, IEC standartuose numatomi įvairūs pakeitimai, pavyzdžiui IEC 60335-2-89:

- Leidžiamą A3 grupės degių šaldymo agentų dozės ribą komercinėse sistemose žadama pakelti nuo 150 g iki 500 g pirmoje 2019 m. pusėje. Šis skaičius gaunamas žemutinę degumo ribą padauginus iš daugiklio 13. Taigi, praktiškai tai reikštų atitinkamai padidėjusias dozes:

$$m_{R290} = 13 \cdot LFL = 13 \cdot 0,038 = 0,494 \text{ kg},$$

atitinkamai – 0,559 kg R600a; 0,598 kg R1270 ir t. t.

- Leidžiamos dozės padidėjimas A2L šaldymo agentams iki 1,2 kg sistemos kontūre. Pasitelkus anksčiau minėtą dozės apskaičiavimo metodiką, šiems šaldymo agentams teoriškai dozės riba turėtų išaugti iki 4 kg. Vis dėlto, atlikti bandymai oro kondicionavimo, šildymo ir šaldymo institute (AHTRI) parodė, kad toks padidėjimas gali būti pavojingas. Todėl pasiūlyta leidžiamą dozę parinkti 2,4 kg, taip sulyginant šaldymo našumą su A3 grupės agentais.
- Koncentracijos bandymas sistemos aplinkoje, kurio metu simuliuojamas nutekėjimas iš kritinio nuotėkio taško.

Įvertinus anksčiau minėtus saugumo bei aplinkosauginius reikalavimus, šaldymo agento dozės mažinimą galima laikyti kaip vieną svarbiausių tikslų kuriant naujas šaldymo bei oro kondicionavimo sistemas. Maža agento dozė užtikrina sistemos emisijų sumažėjimą, o tai savaime mažina ir šiltnamio efektą sukeliančių produktų įtaką. Bet kokia priemonė, mažinanti šaldymo teršalų išmetimą, turi būti įvertinta atsižvelgiant į šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, susijusias su energijos naudojimu.

#### 1.4. Šaldymo agento dozės pasiskirstymas bei masės matavimas

Kitas svarbus aspektas yra šaldymo agento masės matavimas bei dozės pasiskirstymas. Didžioji dalis agento dozės sistemoje būna skysčio būsenos ir priklauso nuo garintuvo ir kondensatoriaus geometrijos, skysčio linijos tūrio, virimo ir kondensacijos temperatūrų, peraušinimo ir alyvos kiekio kompresoriuje.

Vienas iš metodų nustatyti šaldymo agento masės pasiskirstymą šaldymo sistemos – kvaziliniškas (angl. Quasi on-line measurement method – QOMM). Šis metodas jungia tiek skysto azoto metodą

(LNM), tiek linijinį metodą (OMM). Lyginant su LNM, QOMM pagreitina matavimo procesą. Bandyimų rezultatai parodo, kad didžiausias dozes nuokrypis sistemoje nuo numatytos yra 1,7 % [6].

Kitas būdas, pristatytas Björk [7], šaldymo agento kiekio matavimui naudoti greitai užsidarančius vožtuvus, kurių veikimas visiškai automatizuotas. Šiems vožtuvams užsidarius, sistema suskirstoma į įvairius kontrolinius tūrius ir taip užkertamas kelias agento tekėjimui. Kiekvienas kontrolinis tūris išplečiamas į tinkamo dydžio talpą, kad būtų pasiekta perkaitinta būseną. Kai pasiekiamas termodinaminė pusiausvyra, išmatuojamas slėgis bei temperatūra talpoje ir apskaičiuojama šaldymo agento dozė. Toks matavimo būdas labiau tinkamas matuoti mažesniems kiekiams, pavyzdžiui, buitiniuose šaldytuvuose. Pasinaudojant šia metodika, nustatyta, kad didinant šiluminį apkrovimą tiek kompresoriuje, tiek kondensatoriuje šaldymo agento kiekis didėja, o garintuve – mažėja [7]. Būtent garintuve ir pastebima didžiausias agento kiekio pokytis. Lyginant priešingas sąlygas, kai šiluminis apkrovimas mažiausias, o po to didžiausias, atitinkamai pastebimas ir šaltnešio kiekio sumažėjimas daugiau nei 30 %. Toks akivaizdus sumažėjimas garintuve, ir padidėjimas kondensatoriuje bei kompresoriuje aiškinamas didėjančiu slėgiu sistemoje.

Kaip jau minėta, kuo mažesnė dozė šiuolaikinėse sistemose, ypač naudojančiose hidrokarbonus kaip šaldymo agentus (šio darbu atveju R290, taip pat R1270), yra vis aktualesnė. Atlikti tyrimai su žema propano doze optimizuotu šilumos siurbliu, naudojančiu mini-kanalinį aliuminį garintuvą bei šilumokaitį rodo, kad šaldymo agento kiekis siurblyje beveik 100 g mažesnis nei sistemose su įprastiniais plokšteliniais šilumokaičiais. Tokiu atveju, kai perkaitinimas nepriklausomas nuo šaldymo agento dozės ir palaikomas 4–6,5 K, o peraušinimas – priklauso ir yra 4–5 K (įvertinant tokias peraušinimo temperatūras optimizuojama šaltnešio dozės esant skirtingoms šilumos šaltinio temperatūroms), nustatyta, kad esant minimaliai ar didesnei dozei, COP iš dalies išlieka pastovus. Vis dėlto, jei minimali riba peržengiama, ir šaldymo agento per mažai – COP staigiai mažėja. Našumo ir COP sumažėjimą esant mažoms dozėms lemia pažemėjusi virimo temperatūra, dėl per mažo šaltnešio kiekio garintuve. Tokios sistemos agento pasiskirstymo matavimai parodo, kad kintant virimo temperatūrai, šaldymo agento kiekis garintuve beveik nekinta. Tokia pati tendencija pastebima ir skysčio linijoje, tačiau kondensatoriuje, kai palaikoma stabili kondensacijos temperatūra, bet didinama virimo temperatūra, didėja ir jame esantis agento kiekis [8].

Analogiškai, jeigu naudojamas aukšto našumo propano šilumos siurblys su žemos dozės vamzdeliniu šilumokaičiu, lyginant su standartiniais lituotais plokšteliniais šilumokaičiais, lygiai taip pat atsiranda galimybės mažinti dozę. Pavyzdžiui, 100 kW šilumos siurblio be skysčio resiverio su plokšteliniu šilumokaičiu ir garintuvu efektyviam veikimui užtikrinti reikia maždaug 3 kg propano. Jeigu šiuo atveju panaudojamas mini-kanalinis kondensatorius, agento dozė galima sumažinti iki 2,2 kg be didesnio poveikio sistemos efektyvumui [9]. Taigi, galima daryti išvadą, kad norint pastebimai sumažinti reikalingą šaldymo agento dozę sistemoje, verta naudoti mini-kanalinius šilumokaičius.

Dar vienas svarbus sąryšis sieja agento dozę su peraušinimu. Skysčio peraušinimas turi didelę įtaką bendram reikalingam agento kiekiui. Skirtinguose agento fazės taškuose, esant didžiausiam peraušinimui, pastebima jo įtaka dozei siekia 70.3 %, dvifazės būsenos srities – 29.2 %, o perkaitinto garo – 0.5 %. Atitinkamai, esant žemiausiam peraušinimui, jo įtaka dozei siekia 39.4 %, dvifazės būsenos srities – 60.1 % ir perkaitinto garo – 0.5 %. Tai parodo, kad peraušinimo sumažinimas turi savo privalumą – padidėja šilumos mainai bei sumažėja reikalinga šaldymo agento dozė [10].



Vis dėlto galimi ir kitokie rezultatai. Naudojant vanduo-vanduo aušintuvą su R404A šaldymo agentu, optimalus peraušinimas yra daugiau nei 5 K [11]. Choi ir Kim'as [12] atliko tyrimą su šilumos siurbliu ir R22 agentu bei nustatė, kad tokiai sistemai optimalus peraušinimas 4–5 K, o sistemai su R407C – nuo 2 iki 3,5 K. Amoniako sistemose 4,66 K peraušinimas sumažina suslėgimo metu atliekamą darbą 1,74 % (lyginant susistema be peraušinimo) [13]. Optimali peraušinimo temperatūra mažėja, jeigu intensyvėja šilumos mainai (UA vertė). Teoriškai, jeigu šilumos mainų plotas begalinis – peraušinimas yra visiškai nereikalingas.

### 1.5. Šaldymo agento dozės skaičiavimas

Suskaičiuoti šaldymo agento dozę vienfaziam skysčio arba garo srautui (vamzdžiui) ganėtinai paprasta. Agento kiekis resiveryje priklauso nuo jo formos ir užpildymo santykio. Sunkumai iškyla kai reikia įvertinti dvifazius sistemos elementus (šilumokaičius). Egzistuoja nemažai straipsnių apie įvairius dvifazių srautų aspektus. Pavyzdžiui, [14] analizuojami šilumos mainai kondensacijos proceso metu, [15] – slėgio pokytis besikondensuojančiame žiediniame tekėjime, o [16] aprašomas šaldymo agento dozės pasiskirstymas.

Dvifazis srautas turi įvairius tekėjimo modelius. Siekiant nustatyti skysčio dozę, reikia žinoti garo ir skysčio santykį bet kurioje vietoje. Šis santykis skiriasi nuo masės srauto, tankio, tūrio dalies. Skaičiuojant šaldymo agento dozę, reikia žinoti tuštumo laipsnį arba dvifazio srauto vidutinę dujų tūrinę dalį. Tuštumo laipsnis  $i$ -oje pozicijoje išreiškiamas:

$$\varepsilon_{vi} = \frac{dV_{v,i}}{dV_i} = \frac{A_{v,i}}{A_i}. \quad (1.5.1)$$

čia  $dV_i$  – elementarus tūris;  $dV_{v,i}$  – dujų tūris elementariame tūryje;  $A_i$  – skerspjūvio plotas;  $A_{v,i}$  – skerspjūvio dalis užimta dujomis.

Tada elementari masė esanti tūryje  $dV_{v,i}$  yra:

$$dM_i = [\varepsilon_{vi}\rho_{vi} + (1 - \varepsilon_{vi})\rho_{li}]dV_i. \quad (1.5.2)$$

Visame tūryje  $V$  esanti masė (pilna dozė) išreiškiama:

$$M = \int_0^V [\varepsilon_v\rho_v + (1 - \varepsilon_v)\rho_l]dV. \quad (1.5.3)$$

čia  $\rho_{vi}$ ,  $\rho_{li}$  – atitinkamai garų ir skysčio tankiai ( $kg/m^3$ ).

Tuštumo laipsnis įprastai siejamas su sausumo laipsniu  $x$  ( $kg_v/kg$ ) bei nurodo dujinės būsenos masės srauto dalį.

$$\frac{\dot{M}_{vi}}{\dot{M}_{vi} + \dot{M}_{li}} = \frac{G_{vi}}{G_{vi} + G_{li}}. \quad (1.5.4)$$

Vidutinės garo bei skysčio greičių reikšmės išreiškiamos taip:

$$u_{vi} = \frac{G_{vi}}{\rho_{vi}\varepsilon_{vi}}. \quad (1.5.5)$$

$$u_{li} = \frac{G_{vi}}{\rho_{li}(1-\varepsilon_{vi})}. \quad (1.5.6)$$

čia  $G_{vi}$  ir  $G_{li}$  – atitinkamai garų ir skysčio masės srautai ( $kg/(m^2s)$ ) pasirinktos pozicijos  $i$ .

Slydimo koeficientas išreiškiamas:

$$S_i = \frac{u_{vi}}{u_{li}}. \quad (1.5.7)$$

Pasinaudojant šiomis formulėmis, tuštumo laipsnis susiejamas su sausumo laipsniu ir išreiškiamas:

$$\varepsilon_{vi} = \left(1 + S_i \frac{(1-x_i) \rho_{vi}}{x_i \rho_{li}}\right)^{-1}. \quad (1.5.8)$$

Termodinaminės sąlygos nustatomos kai žinomas slėgis ir temperatūra. Slydimo koeficientas nustatomas panaudojant koreliacijas. Paprasčiausias būdas – pasirinkti, kad garų-skysčio mišinį kaip homogeninį srautą, kuriame vidutinis skysčio greitis lygus vidutiniam garo greičiui ( $S_i = 1$ ).

Tuomet tuštumo laipsnis lygus:

$$\varepsilon_{hom} = \left(1 + \frac{(1-x) \rho_v}{x \rho_l}\right)^{-1}. \quad (1.5.9)$$

Premoli parašė koreliaciją slydimo koeficientui, esant žiediniam tekėjimui vamzdyje.

$$S = 1 + E_1 \sqrt{Y/(1 + YE_2) - YE_2}. \quad (1.5.10)$$

$$E_1 = 1.578 Re_l^{-0.19} (\rho_l/\rho_v)^{0.22}. \quad (1.5.11)$$

$$E_2 = 1.578 \cdot We \cdot Re_{lo}^{-0.51} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{-0.08}. \quad (1.5.12)$$

Čia -  $D_h$  – hidraulinis skersmuo, m;  $\sigma$  – paviršiaus įtempis, N/m;  $G$  – masės srautas,  $kg/(m^2s)$ ;  $\mu_l$  – skysčio dinaminė klampa,  $Pa \cdot s$ .

Aukščiau aprašytų lygčių koeficientai randami taip:

$$Y = \frac{\varepsilon_{hom}}{1-\varepsilon_{hom}}. \quad (1.5.13)$$

Weber'io skaičius:

$$We = \frac{G^2 D_h}{\sigma \rho_l}. \quad (1.5.14)$$

Reynolds'o skaičius skysčio daliai:

$$Re_l = GD_h(1-x)/\mu_l. \quad (1.5.15)$$

Reynolds'o skaičius tik skysčiui:

$$Re_{lo} = GD_h/\mu_l. \quad (1.5.16)$$

Premoli koreliacija yra viena iš labiausiai tinkančių šaldymo sistemoms. Ji vienintelė duoda tenkinančius rezultatus skaičiuojant šaldymo agento dozę kondensatoriuje, kai tuo tarpu kitos homogeninės koreliacijos kondensatoriuje esančio šaldymo agento pakankamai neįvertina.

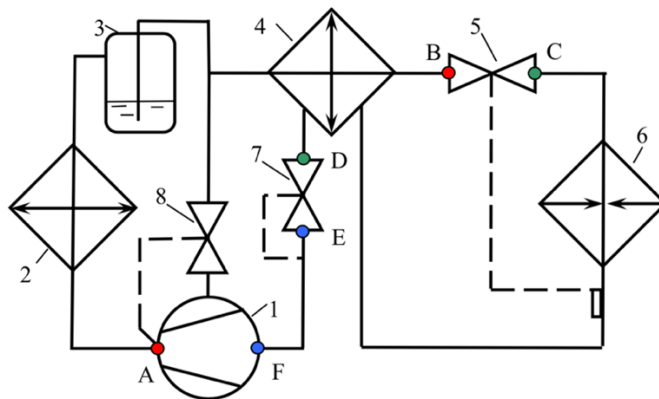
## 1.6. Eutektinė šaldymo sistema

Šio darbo pagrindinis tyrimo objektas – transportinis šaldytuvas su eutektine šaldymo sistema, skirtas šaldytų produktų (ledų, daržovių, mėsos ir t.t.) išvežiojimui bei pristatymui. Eutektinėse sistemose šiluminei energijai absorbuoti naudojama fazinę būseną keičianti medžiaga (eutektinis skystis). Fazinis virsmas vyksta iš šios medžiagos šalinant šilumą (medžiaga užšąla – būseną tampa kieta) arba atvirkščiai – suteikiant šilumos, kai būseną iš kietos pereina atgal į skystą. Eutektinis skystis tokiose sistemose įprastai laikomas plieninėse arba aliuminėse talpose (eutektinėse plokštėse).

Tokia sistema turi nemažai privalumų. Dėl itin didelės sukauptos terminės masės eutektiniame skystyje bei fazių kaitos, šaldymo agregatui nedirbant sistemoje šaltis išlaikomas ilgą laiką tarpą (produktų išvežiojimo metu). Nakties metu, kai automobilis stovi bazėje (garaže, automobilių parke ar p.nš.), šaldytuvas įjungiamas į tinklą, sistema pradeda dirbti – taip eutektinis skystis vėl užšaldomas ir šaldytuvas paruošiamas sekančiam darbo dienai. Tamsiuoju paros metu aplinkos temperatūra taip pat yra žemesnė, o tai reiškia žemesnę kondensacijos temperatūrą, todėl didėja sistemos efektyvumas.

Tam, kad vidiniuose šaldytuvo skyriuose būtų palaikoma –18°C temperatūra, naudojamas eutektinis skystis, kuris pilnai susikristalيزuoja esant –33°C. Vykstant skysčio kristalizacijai, virimo temperatūra svyruoja tarp –43°C ir –45°C, o atšaldymo ciklo pabaigoje gali nukristi iki 50°C ar net 57°C. Nominaliomis sąlygomis (aplinkos temperatūra  $t_{amb} = 20^\circ\text{C}$ ) kondensacijos temperatūra siekia 26°C - 28°C. Taip pat transportinis šaldytuvas privalo veikti ir prie aukštesnių temperatūrų – aplinkos temperatūrai esant 38°C, kai kondensacijos temperatūra išauga iki 55°C. Tokios temperatūros reiškia, kad kompresoriaus suslėgimo laipsnis yra labai didelis, o energijos panaudojimas prastas. Pavyzdžiui, šaldymo agentui esant R507A, suslėgimo laipsnis yra >24. Įprastiniai stacionariuose šaldytuvuose, dirbančiuose tokiomis temperatūromis paprastai būtų naudojamos dvipakopės šaldymo sistemos su aušintuvais. Vis dėlto, kadangi transportiniuose šaldytuvuose erdvė bei svoris yra svarbūs faktoriai, šiuo atveju naudojamos vienpakopės sistemos.

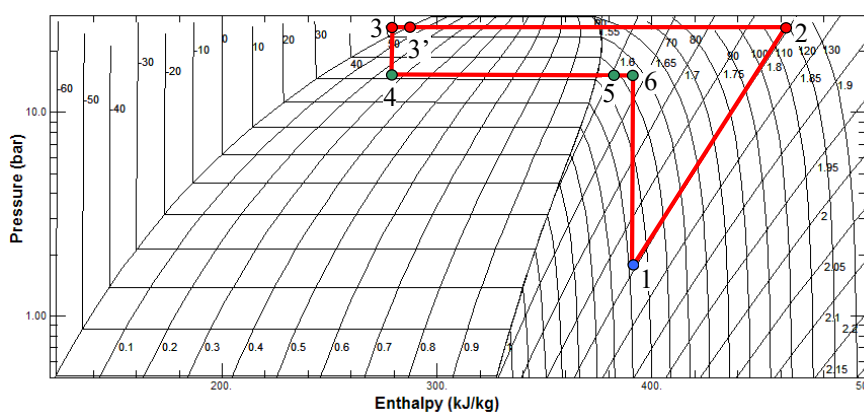
Tradicinėse eutektinėse sistemose dažniausiai naudojami tiesioginio išsiplėtimo mechaniniai termostatiniai vožtuvai (TXV), aukšto slėgio skysčio resiveris ir garų – skysčio šilumokaitis. Įprastai naudojami spiralinio tipo kompresoriai su skysčio įpurškimu per išmetimų garų temperatūros reguliavimo vožtuvą. Nors nominaliomis sąlygomis virimo temperatūra yra labai žema, pačioje atšaldymo pradžioje eutektinių plokščių temperatūra lygi aplinkai, todėl virimo temperatūra taip pat arti jai. Žemų temperatūrų kompresoriai esant tokioms sąlygoms veikti negali, todėl reikalingas maksimalaus darbinio slėgio (MOP) reguliavimas. MOP kontroliuojamas karterio slėgio regulatoriumi. Taip pat, eutektinių plokščių šiluminė inercija ganėtinai didelė, o tai pailgina laiką, kai sistema reguliuojama MOP. Maksimalus darbinis slėgis parenkamas eksperimentiškai, atliekant atšaldymą prie didžiausios vertinamos aplinkos temperatūros (35°C arba 38°C). MOP apribojimais atsiranda dėl kompresoriaus maksimalios elektrinės srovės bei maksimalaus slėgio kondensatoriuje. Sistemose su TXV, eutektinės plokštės sujungiamos į dvi lygiagrečias šakas (kiekvienai šakai priklauso atskiras TXV). Tokiu būdu sumažinami slėgio nuostoliai. [17] Tokios sistemos supaprastinta principinė schema pavaizduota 1.4 pav.



**1.2 pav.** Eutektinė šaldymo sistema. Šioje sistemoje 1 – kompresorius; 2 – kondensatorius; 3 – resiveris; 4 – šilumokaitis; 5 – išsiplėtimo vožtuvas; 6 – garintuvas (eutektinės plokštės); 7 – OPR; 8 – išmetamų garų temperatūros reguliatorius (angl. discharge temperature control – DTC)

Paanalizuokime tokios sistemos darbą pačioje atšaldymo pradžioje, esant aukštomis aplinkos temperatūroms (priimama, kad pradinė plokščių temperatūra lygi aplinkos temperatūrai). Taip pat priimama, kad termostatinis išsiplėtimo vožtuvas riboja šaldymo agento tiekimą į garintuvą tik pagal perkaitimą išėjime, t.y. našumas arba MOP nėra ribojantys faktoriai. Tokiu atveju šilumos mainų plotas skirtas garavimui yra beveik pastovus, o skirtumas tarp plokščių ir virimo temperatūrų lengvai siejamas su kompresoriaus šalčio našumu – mažėjant našumui, temperatūrų skirtumas taip pat mažėja.

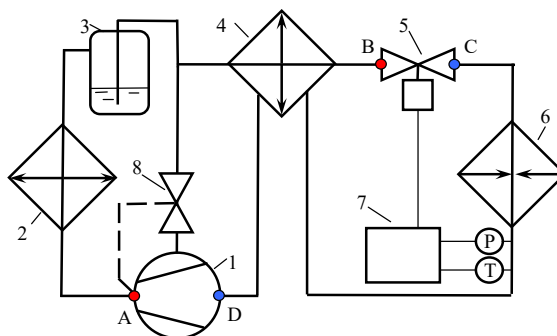
Sistemai, kurios darbas pavaizduotas pav. 1.3, OPR nustatymas yra 1,7 bar ( $-35,5^{\circ}\text{C}$  virimas), o kondensacijos temperatūra ne didesnė nei  $55^{\circ}\text{C}$ . Skysčio – garo šilumokaičio efektyvumas priimamas  $\eta_{hx} = 0,5$ . Kompresoriaus šalčio našumas lygus maždaug 1,5 kW (šiek tiek žemesnis už nominalų). Tada temperatūrų skirtumas garintuve taip pat priimamas šiek tiek žemesnis už nominalų (7 K), o virimo temperatūra  $31^{\circ}\text{C}$ . Tariama, kad garo perkaitimas garintuvo išėjime lygus 6K, o temperatūra prieš OPR, esant jau nurodytam šilumokaičio efektyvumui, bus  $46^{\circ}\text{C}$ .



**1.3 pav.** Atšaldymo pradžios p-h diagrama ( $38^{\circ}\text{C}$  aplinkos temperatūra); 1-2 – suslėgimas kompresoriuje, 2-3' – kondensacija, 3'-3 – peraušinimas šilumokaityje, 3-4 – išsiplėtimas termoreguliaciniame vožtuve, 4-5 – virimas ir perkaitimas garintuve, 5-6 – perkaitimas šilumokaityje, 6-1 – išsiplėtimas OPR.

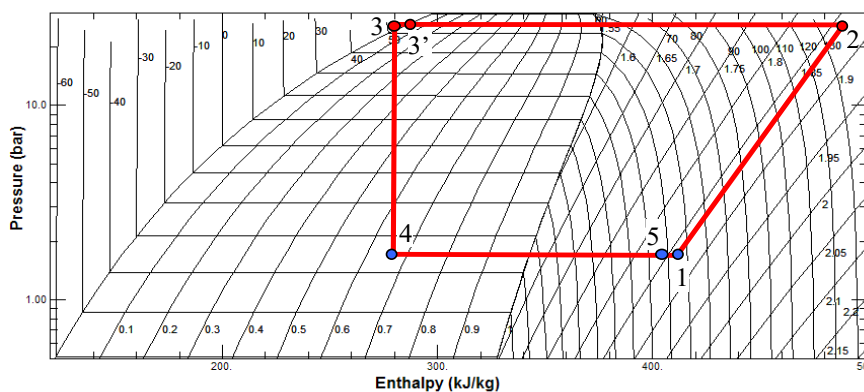
Šioje diagramoje suslėgimas izoentropinis, nors realioje sistemoje išmetimo temperatūra yra reguliuojama DTC vožtuvo ir palaikoma maždaug 80°C, tačiau tai didelės įtakos tolimesnei analizei neturi. Matomas slėgių skirtumas tarp kondensacijos ir virimo yra apie 11 bar. Kompresoriaus našumas artimas nominaliam, todėl TXV našumas neturėtų būti ribojantis faktorius.

Galima alternatyva mechaniniams termostatiniais išsiplėtimo vožtuvams - elektroniniai išsiplėtimo vožtuvai (EEV). Jeigu šaldymo sistema yra valdoma elektroninio išsiplėtimo vožtuvo (EEV), OPR vožtuvas nenaudojamas, kadangi pats kontroleris gali riboti į garintuvą tiekiamo šaldymo agento kiekį pagal siurbimo temperatūrą – MOP funkcija nepaiso perkaitinimo valdymo. Tokios sistemos supaprastinta schema pateikta pav. 1.4.



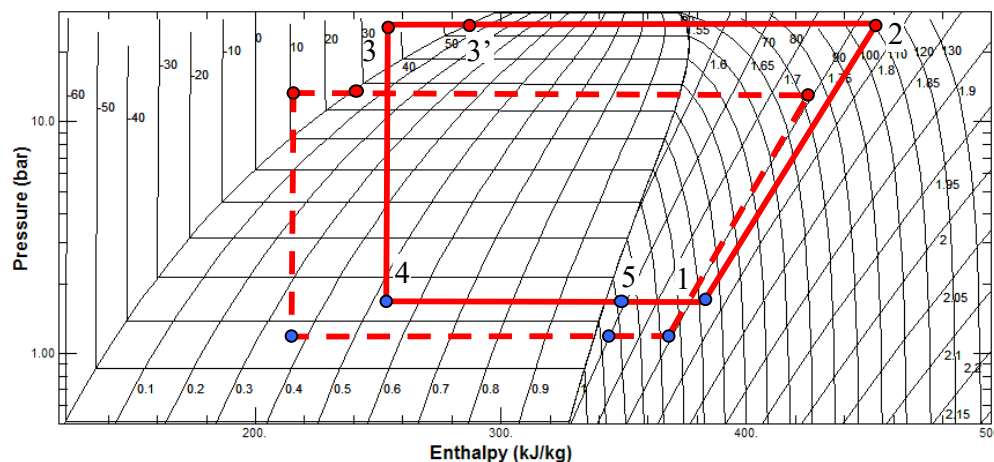
**1.4 pav.** Supaprastinta tradicinės eutektinės sistemos schema; 1 – kompresorius, 2 – kondensatorius, 3 – skysčio resiveris, 4 – garo-skysčio šilumokaitis, 5 – elektroninis išsiplėtimo vožtuvas (EEV), 6 – garintuvas (eutektinės plokštės), 7 – valdiklis, 8 – DTC vožtuvas

Patyrinėkime tokios sistemos darbą esant praeitame pavyzdyje aprašytoms sąlygoms. Kadangi šioje sistemoje nėra OPR vožtuvo, EEV riboja šaldymo agento tiekimą į garintuvą, kad slėgis jame neviršytų MOP nustatymo. Virimo temperatūra lygi apytiksliai  $-35^{\circ}\text{C}$ . Skirtumas tarp plokščių ir virimo temperatūros yra daugiau nei 70K – beveik 10 kartų didesnis nei ankstesniame pavyzdyje. Kadangi kompresoriaus šalčio našumas abiem atvejais maždaug toks pat, šilumos mainų plotas skirtas garavimui proporcingai mažėja, o taip savaime padidina šilumos mainų plotą perkaitinimui. Atšaldymo pradžioje perkaitinto garo temperatūra garintuvo išėjime yra artima plokščių temperatūrai. Iš karto po paleidimo, sistemos su EEV ciklo diagrama pateikta pav. 1.5.



**1.5 pav.** Sistemos su EEV ciklas (aplinkos temperatūra  $38^{\circ}\text{C}$ ); 1-2 – suslėgimas, 2-3' – kondensacija, 3'-3 – peraušinimas šilumokaityje, 3-4 – išsiplėtimas EEV, 4-5 – virimas ir perkaitimas garintuve, 5-6 – perkaitimas šilumokaityje.

Tolesnio veikimo metu plokščių temperatūra krinta, garintuvas palapsniui užpildomas skysčiu, o perkaitinimas garintuve sumažėja iki maždaug 6°C. Ciklas iš pavaizduoto pav. 1.5 po truputį tampa ciklu pavaizduotu pav. 1.6.



**1.6 pav.** Sistemos veikimas esant nominaliomis sąlygomis (brūkšniuota linija)

Įprastinės sistemos su OPR ciklas taip pat kinta – virimo temperatūra krinta, garų perkaitimas skysčio-garo šilumokaityje didėja, slėgio kritimas OPR taip pat krinta. Galiausiai tokios sistemos ciklas susilygina su pavaizduotu 1.6 pav. Nuo šio momento nei OPR, nei elektroninio išsiplėtimo vožtuvo MOP funkcija nebeįtakoja sistemos darbo.

Verta atkreipti dėmesį ir į kondensatorius. Įprastinėse eutektinėse sistemose naudojami tradicinio tipo kondensatoriai – su variniu vamzdeliu bei aliuminėmis lamelėmis. Vis dėlto, kaip jau minėta ankstesniame skyriuje, dozės mažinimui dažnai rekomenduojami mikro-kanaliniai kondensatoriai. Deja, šiuos kondensatorius pritaikyti transportiniuose šaldytuvuose dėl kiaurymių atsiradimo rizikos yra keblu. [18]

Analizuojant šią problemą, nustatyta, kad tokių kondenserių gamybai naudojama aliuminio lydinio markė EN AW-3103. Šis lydinys plačiai naudojamas šildymo bei šaldymo įrangos ir komponentų gamyboje (automobilinių radiatorių, šaldytuvų bei oro kondicionierių garintuvų ir kondensatorių gamyba). Analizuojant R507A šaldymo agento bei poliesterinio tepalo atliekas aptinkama šių metalų pėdsakai ( $mg \cdot kg^{-1}$ ): Al – 237,5, Fe – 62,5, Cu – 21,7, Zn – 15,3. Toks didelis šių metalų kiekis mišinyje atsiranda dėl šaldymo sistemoje vykstančių korozijos bei erozijos procesų. Taip pat išmatuotas tepalo pH lygus 5, o tai reiškia, kad terpė rūgštingesnė nei prieš sistemos eksploataciją. Toks pH sumažėjimas, gali indikuoti vandens atsiradimo tepale bei tepalo oksidacijos procesus. Kadangi poliesterinis tepalas yra itin higroskopiškas, jis gali absorbuoti didelius kiekius vandens prie eksploatacinių aplinkos sąlygų. Tarp tepalo ir vandens vyksta cheminė reakcija, jos metu išsiskiria organinės rūgštys, kurios ir sukelia reaktyviųjų metalų koroziją. Skenavimo elektronų mikroskopija metu ant kondensatoriaus kanalo sienelių pastebėtos mikro-ertmės bei įtrūkimai, o platuose aplink juos – žymus geležies kiekio sumažėjimas.

Rekomendacijos korozijos prevencijai: 1) geresnė kanalų gamybos kokybės kontrolė; 2) visos sistemos surinkimo bei užpildymo metu turi būti užtikrinta, kad drėgmė į ją nepateks; 3) drėgmės bei nuosėdų šalinimas papildomų filtrų pagalba.

Pagal gamintojų tiekiamą informaciją, kondensatoriai pagaminti iš tokio paties aliuminio buvo sėkmingai naudojami automobilių pramonėje (tikėtina su R134 ir PAG tepalais). Šaldymo prietaisų gamybos technologijoje visuomet pirmenybė teikiama drėgmės patekimo į sistemą (dėl termostatinio išsiplėtimo vožtuvo žikleryje atsirandančių ledo kamščių, filtro – sausintuvo užsikimšimo ir t.t.) rizikos mažinimui. Tačiau reikia įvertinti, kad polinių hidrokarbonų ir poliesterinio tepalo mišinys reikalauja daug griežtesnio drėgmės mažinimo.

## 2. Tiriamoji dalis

Šiame skyriuje atliekami šaldymo agento dozės skaičiavimai su propanu (R290) bei palyginimui su propilenu (R1270). Skaičiavimų tikslas – nustatyti, kokia šių agentų dozė sistemoje tiek prie maksimalių, tiek prie nominalių sąlygų, kadangi kaip jau minėta, A3 grupės šaldymo agentams galioja griežti dozės reikalavimai. Pirmoje dalyje parenkamas šaldymo agentas – R507A, o sistema standartinė - serijinė. Skaičiavimai su R507A reikalingi, kadangi sistemoje su R290 / R1270 naudojamo kompresoriaus charakteristikos gamintojo dar nėra pateiktos, todėl masiniam debitui bei suslėgimo darbui apskaičiuoti panaudojami gauti rezultatai su R507A. Skaičiavimų rezultatai apibendrinami ir suvedami į lentelę.

### 2.1. Dozės skaičiavimas sistemai su R507A agentu (nominalios sąlygos)

#### 2.1.1. R507A dozė garintuve

Atliekamas skaičiavimas įvertinti šaldymo agento dozei garintuve panaudojant anksčiau sudarytą matematinį modelį ir Premoli koreliaciją slydimo santykiui.

Pirmiausia skaičiavimo modelis pritaikomas R507A šaldymo agentui garintuve.

Užsидуodami pradiniai duomenys:  $\varnothing 15 \times 1$  garintuvo vamzdis, 4 didelės eutektinės plokštės (1630x630x24 mm) + 1 maža eutektinė plokštė (770x630x24 mm). Sistema sujungta į dvi šakas su atskirais išsiplėtimo vožtuvais. Atitinkamai vienoje šakoje 2 didelės plokštės, kitoje - 2 didelės ir 1 maža. Garintuvo trumposios šakos vamzdelio ilgis  $L_1 = 20 \text{ m}$ , o ilgosios šakos  $L_2 = 25 \text{ m}$ .

Kondensacijos temperatūra  $T_c = 27^\circ\text{C}$ ; virimo temperatūra  $T_0 = -43^\circ\text{C}$ . Šaldymo agento savybės gaunamos iš REFPROP duomenų bazės, ją susiejus su MATLAB programine įranga. Taigi, kondensacijos slėgis  $p_k = 1350,3 \text{ kPa}$ . Nominaliomis sąlygomis MOP reguliavimas nevyksta ir įtakos bendrai agento dozei neturi.

Atliekant skaičiavimus priimta keletas sistemos veikimo supaprastinimų. Realioje eutektinėje sistemoje kompresoriaus išmetimo temperatūra yra kontroliuojama DTC vožtuvo, tačiau šiuo atveju priimama, kad suslėgimas izoentropinis. Ši sąlyga dozės skaičiavimui garintuve įtakos neturi, bet yra svarbi analizuojant kondensatorių. Kai naudojamas skysčio įpurškimas per DTC vožtuvą, kondensatoriuje esančio šaldymo agento masinis debitas yra didesnis nei garintuve. Dar viena priimta sąlyga – pastovi kondensacijos temperatūra, bei pastovus skysčio-garo šilumokaičio efektyvumas.

Į kompresorių siurbiamų garų temperatūrą galima apskaičiuoti žinant šilumokaičio naudingumą, kuris nusakomas:

$$\eta_{hx} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \quad (2.1.1)$$

Čia –  $\eta_{hx}$  – šilumokaičio naudingumo koeficientas;  $T_1$  – iš garintuvo ištekiančio garo temperatūra,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_2$  – siurbiamų garų temperatūra;  $T_3$  – iš kondensatoriaus ištekiančio skysčio temperatūra.

Užsiduodama, kad šilumokaičio efektyvumas  $\varepsilon = 75 \%$ . Tada iš 2.3.5 lygties išreiškiama į kompresorių siurbiamų garų temperatūra  $T_2$ .

$$T_2 = T_1 + \eta_{hx}(T_3 - T_1) \quad (2.1.2)$$



Pagal šią lygtį (2.3.6) gaunama siurbiamų garų temperatūra. Taip pat įvertinamas 6 K perkaitinimas termoreguliaciniame išsiplėtimo vožtuve. Taigi:

$$T_a = T_o + 6 = -43 + 6 = -37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Į kompresorių siurbiamų garų temperatūra:

$$T_1 = T_a + \varepsilon(T_3 - T_a) = -37 + 0,75 \cdot (27 + 37) = 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Šilumokaityje pataušinto skysčio temperatūrą galima paskaičiuoti.

Kadangi tolimesniems skaičiavimams reikalingi fluideo būsenos parametrai, jie parenkami iš REFPROP duomenų bazės.

Randamos būsenos taškus atitinkančios entalpijos. Taigi, siurbiamų garų entalpija, atitinkanti apskaičiuotą temperatūrą  $T_1$ :

$$h_1 = 380,8 \text{ kJ/kg}$$

Garų entalpija po perkaitimo:

$$h_a = 341,4 \text{ kJ/kg}$$

Iš kondensatoriaus išeinančio skysčio entalpija:

$$h'_3 = 237,6 \text{ kJ/kg}$$

Iš šilumokaičio ištekančio skysčio entalpiją išreiškiame iš šilumos balanso:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_a) = \dot{m}(h'_3 - h_3). \quad (2.1.3)$$

Tada entalpija:

$$h_3 = h'_3 - (h_1 - h_a). \quad (2.1.4)$$

Įstatę reikšmes gauname:

$$h_3 = 237,6 - (380,8 - 341,4) = 198,2 \text{ kJ/kg}$$

Žinant  $h_3$  galima rasti iš šilumokaičio ištekančio skysčio temperatūrą taikant priklausomybę:

$$t_3 = f(p_3, h_3)$$

Pasinaudojant REFPROP duomenų baze, apskaičiuojami būsenos taškai:

$$p_3 = 1351,5 \text{ kPa}; t_3 = -0,165^\circ\text{C}$$

Virimo slėgis:

$$p_0 = 120,9 \text{ kPa}$$

Sausumo laipsnis:

$$x = 0,287 \text{ kg/kg}$$

Skysčio tankis:

$$\rho_l = 1305,1 \text{ kg/m}^3$$

Skysčio dinaminis klampis:

$$\mu_l = 3,196 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Paviršiaus įtempis:

$$\sigma = 0,0135 \text{ N/m}$$

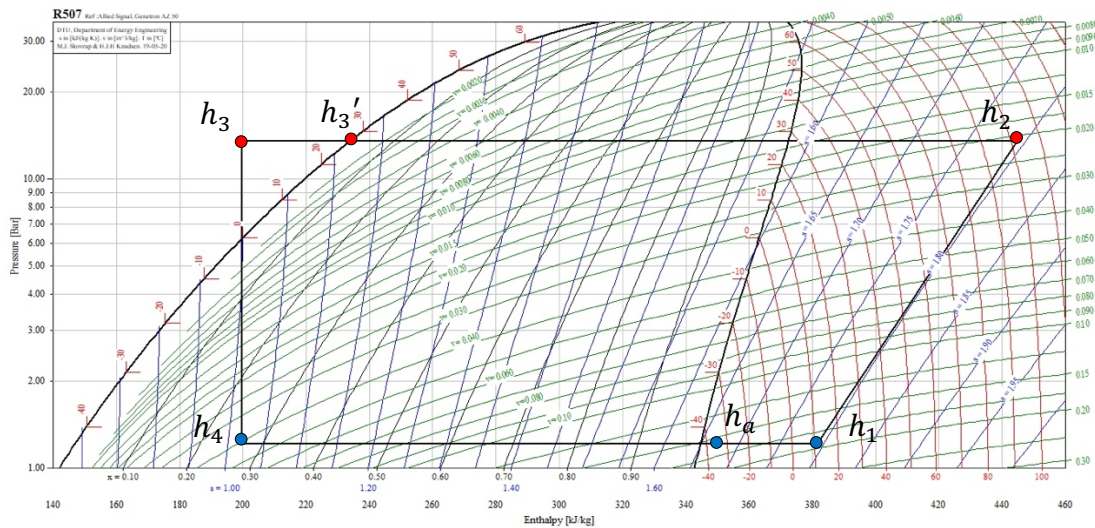
Garų tankis:

$$\rho_g = 6,598 \text{ kg/m}^3$$

Garų dinaminis klampis:

$$\mu_g = 9,324 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Pradinės sąlygos įvedamos į CoolPack programinę įrangą ir braižomas šaldymo ciklas p-h diagramoje. Atitinkamai pažymimi būsenos taškai:



2.1 pav. R507A šaldymo ciklas (nominalios sąlygos)

Kompresoriaus darbo charakteristikos deklaracija Europoje ir Šiaurės Amerikoje yra reguliuojama pagal standartus EN 12900 ir AHRI 540. Standartai nurodo, kad į kompresoriaus darbo charakteristiką turi būti įtraukiamas šaldymo našumas, šaldymo agento masinis debitas, galinumas esant tiek virimo, tiek kondensacijos temperatūroms.

Minėti standartai dažnai naudojami šioje pramonės šakoje ir naudoja 10-ies koeficientų polinomine lygtį, kuria aprašomas šalčio našumas, suvartojama galia, masinis debitas.

$$X = C_0 + C_1 T_0 + C_2 T_c + C_3 T_0^2 + C_4 T_0 T_c + C_5 T_c^2 + C_6 T_0^3 + C_7 T_c T_0^2 + C_8 T_0 T_c^2 + C_9 T_c^3. \quad (2.1.5)$$

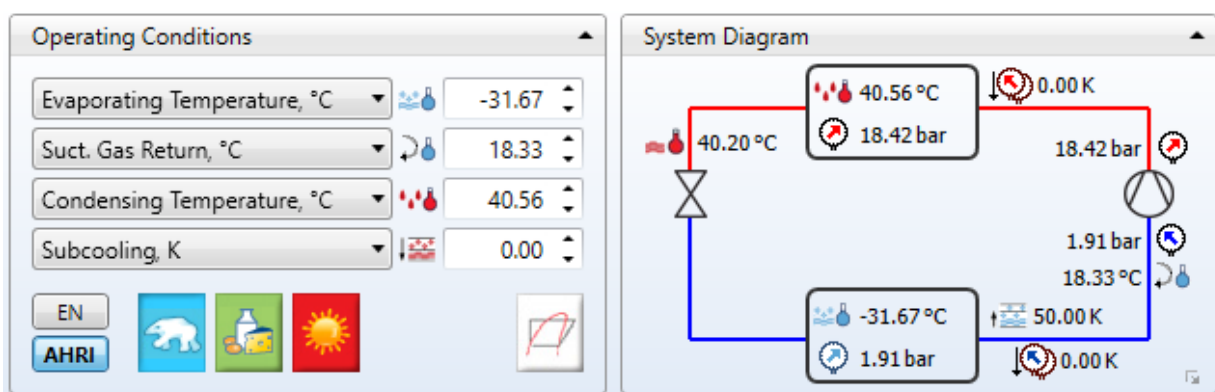
Čia -  $C_0 - C_1$  – gamintojo suteikiami regresijos koeficientai,  $T_c$  – kondensacijos temperatūra,  $T_0$  – virimo temperatūra,  $X$  – ieškomasis parametras.

Gautų duomenų tikslumas gali būti įtakojamas įvairių faktorių, įskaitant matavimo neapibrėžtumus, regresijos neapibrėžtumus, kiekvieno kompresoriaus darbo skirtumus, darbą už normalių kompresoriaus charakteristikos ribų (ekstrapoliacija). Charakteristikoje esančių taškų pozicija bei

skaičius taip pat įtakoja polinominės lygties tikslumą. Matavimo neapibrėžtumas yra gerai žinomas ir į jį gali būti atsižvelgta išvedant rezultatus. Vis dėlto, matavimo neapibrėžtumas įprastai nėra tiesiogiai siejamas su regresijos neapibrėžtumu, todėl bendras neapibrėžtumas naudojant minėtą polinominę lygtį nėra žinomas. [19]

Vertinant lygtį, atlikus regresijos neapibrėžtumo analizę naudojant Monte Carlo simuliacijos metodą, rezultatai rodo, kad vidutinis neapibrėžtumas vertinant masinį debitą gali siekti 4%, o galios 5%. Šie skaičiai yra dar didesni didesnio našumo kompresoriams. Daugumai kompresorių didžiausi nepibrėžtumai pastebimi prie jų darbo charakteristikai žemų siurbimo bei išmetimo temperatūrų.

Taigi, aprašytus regresijos koeficientus parenkame Copeland ZF09K4E kompresoriui iš programinės įrangos SELECT 8. Charakteristika pateikiama prie standartinių žemų temperatūrų sąlygų, siurbimo temperatūra 18,33°C.



2.2 pav. SELECT programos langas. Standartinės sąlygos.

Gauti koeficientai šalčio našumui, suvartojamai galiai ir masiniam debitui surašomi į lentelę 2.1:

2.1 lentelė. Regresijos koeficientai

	Q, kW	P, kW	$\dot{m}$ , g/s
C0	11.42850888	1.698434508	62.11016601
C1	0.382748504	0.029654277	2.235786852
C2	-0.094532121	0.007328076	-0.043113964
C3	0.004604689	0.000181182	0.033523442
C4	-0.00317093	$-6.05219 \cdot 10^{-5}$	-0.001171044
C5	$-7.45382 \cdot 10^{-5}$	0.000138069	-0.000339699
C6	$1.9145 \cdot 10^{-5}$	$-1.38282 \cdot 10^{-6}$	0.000243461
C7	$-3.30759 \cdot 10^{-5}$	$1.52645 \cdot 10^{-6}$	$2.40121 \cdot 10^{-5}$
C8	$-5.67966 \cdot 10^{-6}$	$-7.46215 \cdot 10^{-7}$	$3.81801 \cdot 10^{-7}$
C9	$-2.37946 \cdot 10^{-6}$	$2.00356 \cdot 10^{-6}$	$-3.47091 \cdot 10^{-6}$

Žinant regresijos koeficientus, galima apskaičiuoti šalčio našumą:

$$X(Q_{18,33}) = 1,517 \text{ kW}$$

Suvartojamą galingumą:

$$X(\dot{W}_{18,33}) = 1,376 \text{ kW}$$

Kompresoriaus masinį debitą prie siurbiamų garų temperatūros:

$$X(\dot{m}_{18,33}) = 0,0097 \text{ kg/s}$$

Masinis debitas perskaičiuojamas esant 11°C siurbiamų garų temperatūrai. Pirmiausia randamas garų tankis esant standartinėms sąlygoms:

$$\rho_{18,33} = 5,041 \text{ kg/m}^3$$

Garų tankis temperatūrai esant 11°C:

$$\rho_{11} = 5,182 \text{ kg/m}^3$$

Tada bendras masinis debitas garintuve:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{18,33} \cdot \frac{\rho_{11}}{\rho_{18,33}} = 0,0097 \cdot \frac{5,182}{5,041} = 0,0099 \text{ kg/s}$$

Kadangi sistemoje dvi lygiagrečios šakos, tai debitas šakoje su dviem didelėmis plokštėmis:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{\Sigma} \cdot \frac{2}{4,5} = 0,0044 \text{ kg/s}$$

Šaka su dviem didelėmis ir viena maža plokšte:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{\Sigma} \cdot \frac{2,5}{4,5} = 0,0055 \text{ kg/s}$$

Toliau atliekamas dozės skaičiavimas pagal anksčiau aprašytą metodiką. Vamzdelio skerspjūvio plotas:

$$A_{suc.p} = \frac{\pi D_g^2}{4} = \frac{0,013\pi}{4} = 1,327 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Masės srautas pirmai šakai:

$$G_1 = \frac{\dot{m}_1}{A_{suc.p}} = \frac{0,0044}{1,327 \cdot 10^{-4}} = 33,267 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Masės srautas, antrai šakai. Šaka ilgesnė, todėl ir srautas gaunamas atitinkamai didesnis:

$$G_2 = \frac{\dot{m}_2}{A_{suc.p}} = \frac{0,0055}{1,327 \cdot 10^{-4}} = 41,584 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Tuštumo laipsnis homogeniniam tekėjimui:

$$\varepsilon_{hom} = \left( 1 + \frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l} \right)^{-1} = \left( 1 + \frac{(1-0,287)}{0,287} \cdot \frac{6,598}{1305,1} \right)^{-1} = 0,9877$$

Parametras Y:

$$Y = \frac{\varepsilon_{hom}}{1 - \varepsilon_{hom}} = \frac{0,9877}{1 - 0,9877} = 80,23$$

Reynolds'o skaičius tik skysčiui (trumpesnė šaka):

$$Re_{l_{o-1}} = \frac{G_1 D_g}{\mu_l} = \frac{33,267 \cdot 0,013}{3,196 \cdot 10^{-4}} = 1353$$

Reynolds'o skaičius tik skysčiui (ilgesnioji šaka):

$$Re_{l_{o-2}} = \frac{G_2 D_g}{\mu_l} = \frac{41,584 \cdot 0,013}{3,196 \cdot 10^{-4}} = 1617$$

Reynolds'o skaičius skysčio daliai dvifaziame sraute (ilgesnioji šaka):

$$Re_{l-1} = \frac{G_1 D_g (1 - x)}{\mu_l} = \frac{33,267 \cdot 0,013 \cdot (1 - 0,287)}{3,196 \cdot 10^{-4}} = 962$$

Atitinkamai, trumpesnei šakai:

$$Re_{l-2} = \frac{G_2 D_g (1 - x)}{\mu_l} = \frac{41,584 \cdot 0,013 \cdot (1 - 0,287)}{3,196 \cdot 10^{-4}} = 1203$$

Weber'io skaičius, trumpesnei šakai:

$$We_1 = \frac{G_1^2 D_g}{\sigma \rho_l} = \frac{33,267^2 \cdot 0,013}{0,0135 \cdot 1305,1} = 0,817$$

Weber'io skaičius, ilgesnei šakai:

$$We_2 = \frac{G_2^2 D_g}{\sigma \rho_l} = \frac{41,584^2 \cdot 0,013}{0,0135 \cdot 1305,1} = 1,277$$

Parametrai E pirmai šakai:

$$E_{1-1} = 1,578 Re_{l-1}^{-0,19} (\rho_l / \rho_g)^{0,22} = 1,578 \cdot 962^{-0,19} \cdot \left(\frac{1305,1}{6,598}\right)^{0,22} = 1,369$$

$$E_{2-1} = 1,578 We_1 Re_{l_{o-1}}^{-0,51} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 0,817 \cdot 1353^{-0,51} \cdot \left(\frac{1305,1}{6,598}\right)^{-0,08} = 3,698 \cdot 10^{-4}$$

Parametrai E antrai šakai:

$$E_{1-2} = 1,578 Re_{l-2}^{-0,19} (\rho_l / \rho_g)^{0,22} = 1,578 \cdot 1203^{-0,19} \cdot \left(\frac{1305,1}{6,598}\right)^{0,22} = 1,312$$

$$E_{2-2} = 1,578 We_2 Re_{l_{o-2}}^{-0,51} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 1,277 \cdot 1617^{-0,51} \cdot \left(\frac{1305,1}{6,598}\right)^{-0,08} = 5,157 \cdot 10^{-4}$$

Slydimio santykis:

$$S_1 = 1 + E_{1-1} \sqrt{Y / (1 + Y E_{2-1}) - Y E_{2-1}} \\ = 1 + 1,369 \sqrt{80,23 / (1 + 80,23 \cdot 3,698 \cdot 10^{-4}) - 80,23 \cdot 3,698 \cdot 10^{-4}} = 13,082$$

$$S_2 = 1 + E_{1-2} \sqrt{Y / (1 + Y E_{2-2}) - Y E_{2-2}}$$

$$= 1 + 1,312 \sqrt{80,23 / (1 + 80,23 \cdot 5,167 \cdot 10^{-4}) - 80,23 \cdot 5,167 \cdot 10^{-4}} = 12,514$$

Toliau skaičiuojamas tuštumo laipsnis abiem šakoms. Taigi, pirmai (trumpesnei) šakai:

$$\varepsilon_{v1} = \left( 1 + S_1 \frac{(1 - x_i) \rho_g}{x_i \rho_l} \right)^{-1} = \left( 1 + 13,082 \cdot \frac{(1 - 0,287)}{0,287} \cdot \frac{6,598}{1305,1} \right)^{-1} = 0,859$$

Tuštumo laipsnis garintuvo ilgesniojoje šakoje:

$$\varepsilon_{v2} = \left( 1 + S_2 \frac{(1 - x_i) \rho_g}{x_i \rho_l} \right)^{-1} = \left( 1 + 12,514 \cdot \frac{(1 - 0,287)}{0,287} \cdot \frac{6,598}{1305,1} \right)^{-1} = 0,865$$

Skerspjuvio plotas užimtas garo pirmoje šakoje:

$$A_{g1} = A_{suc.p} \cdot \varepsilon_{v1} = 1,327 \cdot 10^{-4} \cdot 0,879 = 1,141 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Garų užimamas plotas antroje šakoje:

$$A_{g2} = A_{suc.p} \cdot \varepsilon_{v2} = 1,327 \cdot 10^{-4} \cdot 0,865 = 1,148 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Skerspjuvio plotas užimtas skysčio pirmoje šakoje:

$$A_{s1} = A_{suc.p} - A_{g1} = 1,327 \cdot 10^{-4} - 1,141 \cdot 10^{-4} = 1,861 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Skysčio užimamas plotas antroje šakoje:

$$A_{s2} = A_{suc.p} - A_{g2} = 1,327 \cdot 10^{-4} - 1,148 \cdot 10^{-4} = 1,791 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Skysčio masė garintuvo pirmoje šakoje:

$$M_{s1} = A_{s1} \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \rho_l = 1,861 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{20}{2} \cdot 1305,1 = 0,243 \text{ kg}$$

Skysčio masė garintuvo antroje šakoje:

$$M_{s2} = A_{s2} \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \rho_l = 1,791 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{25}{2} \cdot 1305,1 = 0,292 \text{ kg}$$

Garų masė garintuvo pirmoje šakoje:

$$M_{g1} = (A_{suc.p} - A_{s1}/2) \cdot L_1 \cdot \rho_g = (1,327 \cdot 10^{-4} - 1,861 \cdot 10^{-5}/2) \cdot 20 \cdot 6,598 = 0,0163 \text{ kg}$$

Garų masė garintuvo antroje šakoje:

$$M_{g2} = (A_{suc.p} - A_{s2}/2) \cdot L_2 \cdot \rho_g = (1,327 \cdot 10^{-4} - 1,791 \cdot 10^{-5}/2) \cdot 20 \cdot 6,598 = 0,0204 \text{ kg}$$

Taigi, šaldymo agento kiekis garintuve, pirmoje šakoje:

$$M_{a1} = M_{s1} + M_{g1} = 0,243 + 0,0163 = 0,259 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis garintuve, antroje šakoje:

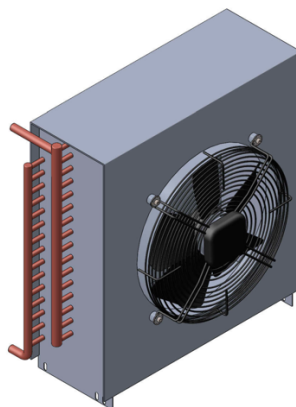
$$M_{a2} = M_{s2} + M_{g2} = 0,292 + 0,0204 = 0,3126 \text{ kg}$$

Bendras šaldymo agento kiekis garintuve:

$$M_{\Sigma g} = M_{a1} + M_{a2} = 0,259 + 0,3126 = 0,5716 \text{ kg}$$

### 2.1.2. R507A dozė kondensatoriuje

Toliau agento dozė skaičiuojama kondensatoriuje. Užsидуodama iš kompresoriaus išmetamų garų temperatūra  $T_{disch} = 102^\circ\text{C}$ . Tokioje sistemoje naudojamas ECO (2,25 L) kondensatorius su šešiomis eigomis. Vienos eigos ilgis  $9,4 \text{ m}$ , vamzdelio vidinis skersmuo  $D_{cond} = 0,00672 \text{ m}$ .



2.3 pav. ECO kondensatoriaus modelis. Izometrinis vaizdas

Kaip ir skaičiuojant garintuvą, randami būsenos parametrai.

Skysčio tankis kondensatoriuje:

$$\rho_{lc} = 1038 \text{ kg/m}^3$$

Skysčio dinaminis klampis:

$$\mu_{lc} = 1,233 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Paviršiaus įtempis:

$$\sigma = 0,0041 \text{ N/m}$$

Garų tankis:

$$\rho_g = 73,061 \text{ kg/m}^3$$

Garų dinaminis klampis:

$$\mu_g = 1,242 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Panaudojant 2.1 lentelėje nurodytus koeficientus bei 2.1.5 lygtį, apskaičiuojamas kompresoriaus suvartojamas galingumas, masinis debitas ir šalčio našumas. Esant standartinėms sąlygoms šie dydžiai tokie pat kaip ir skaičiuojant garintuvą:  $X(\dot{W}_{18,33}) = 1,376 \text{ kW}$ ;  $X(\dot{m}_{18,33}) = 0,0097 \text{ kg/s}$ ;  $X(Q_{18,33}) = 1,517 \text{ kW}$ ;  $\rho_{18,33} = 5,041 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{11} = 5,182 \text{ kg/m}^3$ ;  $\dot{m}_{\Sigma} = 0,0099 \text{ kg/s}$ .

Siurbiamų garų entalpija prie standartinių sąlygų:

$$h_{18,33} = 387,1 \text{ kJ/kg}$$

Siurbiamų garų entalpiją prie galutinės garų temperatūros:

$$h_g = 380,8 \text{ kJ/kg}$$

Šalčio našumas, atitinkantis perkaitinimą šilumokaityje:

$$Q_0 = \left( \frac{Q_{18,33}}{\dot{m}_{18,33}} + h_g - h_{18,33} \right) \cdot \dot{m}_\Sigma = \left( \frac{1,517}{0,0097} + 380,8 - 387,1 \right) \cdot 0,0106 = 1,497 \text{ kW}$$

Entalpija išmetime iš kompresoriaus:

$$h_{disch} = 454,2 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija skysčio išėjime iš kondensatoriaus:

$$h_{c-disch} = 237,56 \text{ kJ/kg}$$

Masinis debitas kondensatoriuje dėl skysčio įpurškimo bus didesnis nei garintuve. Šis debitas apskaičiuojamas kaip nuvedamos šilumos ir entalpijų skirtumo santykis.

$$\dot{m}_c = \frac{Q_0 + \dot{W}_{18,33}}{h_{disch} - h_{c-disch}} = \frac{1,497 + 0,955 \cdot 1,376}{454,2 - 237,56} = 0,013 \text{ kg/s}$$

Vienos eigos masinis debitas:

$$\dot{m}_{c1} = \frac{\dot{m}_c}{6} = \frac{0,013}{6} = 0,0022 \text{ kg/s}$$

Vamzdelio skerspjūvio plotas:

$$A_{cond,p} = \frac{\pi D_{cond}^2}{4} = \frac{0,00672\pi}{4} = 3,547 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Masės srautas:

$$G_{cond} = \frac{\dot{m}_{c1}}{A_{cond,p}} = \frac{0,0022}{3,548 \cdot 10^{-5}} = 60,961 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Toliau, kaip ir garintuvo skaičiavime vėl panaudojama Premoli koreliacija. Visas kondensacijos diapazonas padalinamas į 9 elementus (lygias dalis), keičiant sausumo laipsnį nuo  $x = 0,1 \text{ kg/kg}$  iki  $x = 0,9 \text{ kg/kg}$ . Koreliacijos parametrai skaičiuojami su kiekvienu elementu.

Reynolds'o skaičius tik skysčiui:

$$Re_{c,lo} = \frac{G_{cond} D_{cond}}{\mu_{lc}} = \frac{60,961 \cdot 0,00672}{1,233 \cdot 10^{-4}} = 3323$$

Weber'io skaičius:

$$We_{c1} = \frac{G_{cond}^2 D_{cond}}{\sigma \rho_l} = \frac{60,961^2 \cdot 0,00672}{0,0135 \cdot 1038} = 5,882$$



Parametras E2:

$$E_2 = 1,578 W e_{c1} Re_{c,lo}^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 5,882 \cdot 3323^{-0,51} \cdot \left( \frac{1038}{6,598} \right)^{-0,08} = 0,0021$$

Kiti parametrai skaičiuojami analogiškai garintuvo atvejui, įvertinant, kad kondensacijos diapazonas padalintas į lygias dalis. Rezultatai surašomi į lentelę.

**2.2 lentelė.** Kondensacijos diapazono parametrai (R507A)

<i>x</i>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
$\varepsilon_{c,hom}$	0,612	0,780	0,859	0,905	0,934	0,955	0,971	0,983	0,992
<i>Y</i>	1,578	3,552	6,089	9,471	14,207	21,310	33,149	56,827	127,861
$Re_{c,l}$	2991	2658	2326	1993	1661	1329	997	665	332
$E_1$	0,618	0,632	0,648	0,667	0,691	0,721	0,762	0,823	0,939
$S_{c,1}$	1,775	2,186	2,588	3,033	3,566	4,255	5,238	6,860	10,423
$\varepsilon_{c,v}$	0,471	0,619	0,702	0,757	0,799	0,834	0,863	0,892	0,925
$A_g,$ $10^{-4}m^2$	0,167	0,220	0,249	0,269	0,284	0,296	0,307	0,317	0,328
$A_s,$ $10^{-4}m^2$	0,187	0,135	0,106	0,086	0,071	0,059	0,048	0,038	0,027
$M_{c,s1},$ <i>kg</i>	0,5923								
$M_{g,s1},$ <i>kg</i>	0,1045								

Taigi, šaldymo agento kiekis kondensatoriaus vamzdyje:

$$M_{R507A_{cond}}^{+27^{\circ}C} = M_{c,s1} + M_{g,s1} = 0,5923 + 0,1046 = 0,6967 \text{ kg}$$

Įvertinamas skysčio kiekis kondensatoriaus kolektoriuje. Priimama, kad garo ir skysčio kolektorių tūris lygus viso kondensatoriaus tūrio (2,25 L) ir skaičiuojamo vamzdelio tūrio (2 L) skirtumui. Dozė perkaitinto garo kolektoriuje nevertinama. Tada agento kiekis vien tik skysčio kolektoriuje:

$$M_{R507A_{col}}^{+27^{\circ}C} = \rho_l^{+27^{\circ}C} \cdot V_{col} = 502,8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} = 0,1308 \text{ kg}$$

Bendras R507A kiekis kondensatoriuje, kai kondensacijos temperatūra 27°C:

$$M_{R507A_{cond}} = 0,6967 + 0,1308 = 0,828 \text{ kg}$$

Tada bendra šaldymo agento dozė garintuve ir kondensatoriuje:

$$M_{R507_{ev+cond}} = M_{\Sigma g} + M_{\Sigma c} = 0,5716 + 0,828 = 1,399 \text{ kg}$$

## 2.2. Dozės skaičiavimas sistemai su R290 (nominalios sąlygos)

Toliau skaičiavimo modelis pritaikomas tiriamajai transportinei šaldymo sistemai su propanu (R290). Užsiduodamos pradinės sąlygos.

Propaninė sistema su  $\varnothing 15 \times 1$  garo linijos vamzdžiu, 5 plokštėmis (1630x630x24 mm) + (770x630x24 mm). Šioje šaldymo sistemoje naudojami elektroniniai išsiplėtimo vožtuvai (EEV) ir MOP valdymas. Kaip šie komponentai įtakoja sistemos darbą aprašyta 1.6 skyrelyje.

### 2.2.1. R290 dozė garintuve

Priimamos nominalios sąlygos - kondensacijos temperatūra  $T_c = 27^\circ\text{C}$ ; virimo temperatūra  $T_0 = -43^\circ\text{C}$ ; siurbiamų garų temperatūra jau apskaičiuota ir lygi  $T_{suc} = 11^\circ\text{C}$ .

Apskaičiuojama iš šilumokaičio ištekančio propano skysčio temperatūra. Randamos būsenos taškus atitinkančios entalpijos. Į kompresorių siurbiamiems propano garams ji lygi:

$$h_1 = 607,3 \text{ kJ/kg}$$

Po perkaitimo:

$$h_a = 533,5 \text{ kJ/kg}$$

Iš kondensatoriaus išeinančio skysto propano entalpija:

$$h'_3 = 270,6 \text{ kJ/kg}$$

Iš šilumokaičio ištekančio skysčio entalpiją išreiškiama iš šilumos balanso:

$$h_3 = h'_3 - (h_1 - h_a) = 270,6 - (607,3 - 533,5) = 196,8 \text{ kJ/kg}$$

Žinant entalpiją  $h_3$  randamas taško slėgis ir temperatūra:

$$p_3 = 1001,4 \text{ kPa}; t_3 = -1,39^\circ\text{C}$$

Toliau nurodyti propano garo parametrai, kai  $T_0 = -43^\circ\text{C}$ . Tagi, virimo slėgis:

$$p_0 = 97,42 \text{ kPa}$$

Matyti, kad su R290 šaldymo agentu esant toms pačioms temperatūroms, slėgiai yra žemesni nei su R507A šaldymo agentu.

Sausumo laipsnis:

$$x = 0,231 \text{ kg/kg}$$

Skysčio tankis:

$$\rho_l = 581,9 \text{ kg/m}^3$$

Skysčio dinaminis klampis:

$$\mu_l = 1,992 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Paviršiaus įtempis:

$$\sigma = 0,0158 \text{ N/m}$$

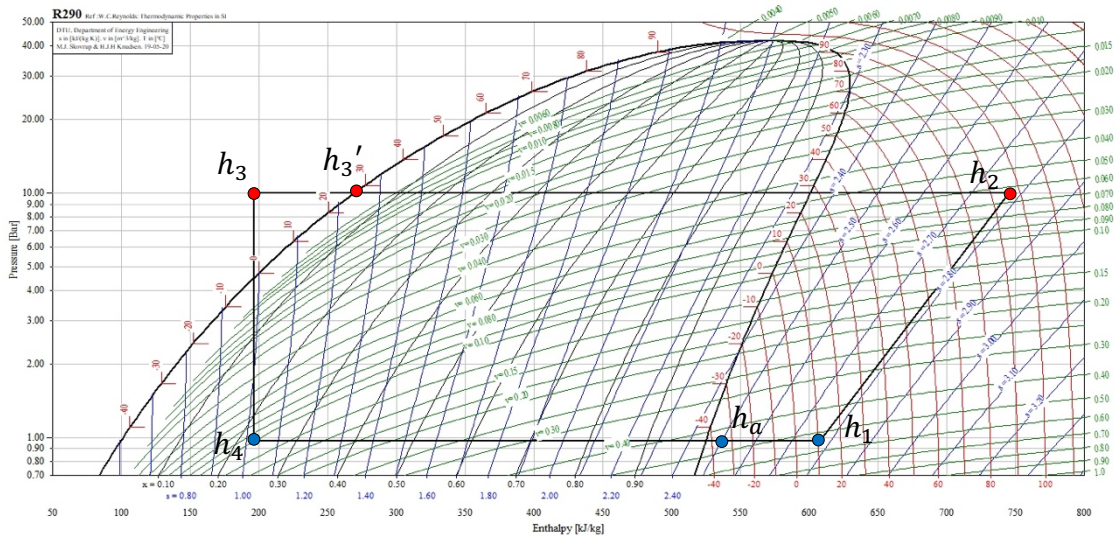
Garų tankis:

$$\rho_g = 2,329 \text{ kg/m}^3$$

Garų dinaminis klampis:

$$\mu_g = 6,286 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Braižomas šaldymo ciklas su propanu p-h diagramoje. Atitinkamai pažymimi būsenos taškai.



2.4 pav. R290 šaldymo ciklas (nominalios sąlygos)

Sistemai su R290 naudojamas kompresorius, kurio koeficientai polinominei charakteristikos lygčiai nėra pateikti. Dėl šios priežasties, masinis debitas perskaičiuojamas sudarant šaltinio našumo balanso lygtį su skaičiuotu R507A.

$$Q_{0R507A} = \dot{m}_{R290} (h_{1R290} - h_{4R290})$$

Čia -  $h_1$  – siurbiamų garų entalpija,  $\text{kJ/kg}$ ;  $h_4$  – garų entalpija po išsiplėtimo,  $\text{kJ/kg}$ .

Išreiškiamas masinis debitas kompresoriuje sistemai su R290:

$$\dot{m}_{R290} = \frac{Q_{0R507A}}{(h_{1R290} - h_{4R290})} = \frac{1,497}{607,3 - 196,8} = 0,0036 \text{ kg/s}$$

Kiti koreliacijos parametrai skaičiuojami analogiškai anksčiau pateiktai skaičiuotei. Rezultatai surašomi į lenteles:

2.3 lentelė. Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (1)

$\frac{G_1, \text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{G_2, \text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$	$\varepsilon_{nom}$	Y	$Re_{l0-1}$	$Re_{l0-2}$	$Re_{l-1}$	$Re_{l-2}$	$We_1$
12,054	15,067	0,986	74,982	786	983	604	756	0,206

2.4 lentelė. Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (2)

$We_2$	$E_{1-1}$	$E_{1-2}$	$E_{2-1}$	$E_{2-2}$	$S_1$	$S_2$	$\varepsilon_{v1}$	$\varepsilon_{v2}$
0,321	1,574	1,508	0,00012	0,00016	14,568	13,982	0,837	0,843

**2.5 lentelė.** Koreliacijos parametrai garintuvui, R290 (3)

$A_{g1},$ $m^2$	$A_{g2},$ $m^2$	$A_{s1},$ $m^2$	$A_{s2},$ $m^2$	$M_{s1},$ $kg$	$M_{s2},$ $kg$	$M_{g1},$ $kg$	$M_{g2},$ $kg$
0,000111	0,000112	0,000022	0,000021	0,1257	0,1517	0,0057	0,0071

Taigi, šaldymo agento kiekis garintuve, pirmoje šakoje:

$$M_{a1} = M_{s1} + M_{g1} = 0,1257 + 0,0057 = 0,1313 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis garintuve, antroje šakoje:

$$M_{a2} = M_{s2} + M_{g2} = 0,1517 + 0,0071 = 0,1589 \text{ kg}$$

Bendras šaldymo agento kiekis garintuve:

$$M_{\Sigma} = M_{a1} + M_{a2} = 0,1313 + 0,1589 = 0,2902 \text{ kg}$$

### 2.2.2. R290 dozė kondensatoriuje

Toliau agento dozė skaičiuojama kondensatoriuje. Priėmus sąlygą, kad suslėgimas izoentropinis, užsiduodama iš kompresoriaus išmetamų garų temperatūra  $T_{dischR290} = 96^{\circ}\text{C}$ . Šioje sistemoje naudojamas REFRA mini-kanalinis mažo tūrio (1 L) kondensatorius, su penkiomis eigomis. Vienos eigos ilgis 9,9 m, vamzdelio vidinis skersmuo  $D_{cond} = 0,0045 \text{ m}$ . Pirma randami pagrindiniai skysčio parametrai.

Kondensacijos slėgis:

$$p_0 = 1001,4 \text{ kPa}$$

Skysčio tankis kondensatoriuje:

$$\rho_{lc} = 489 \text{ kg/m}^3$$

Skysčio dinaminis klampis:

$$\mu_{lc} = 9,513 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Paviršiaus įtempis:

$$\sigma = 0,0068 \text{ N/m}$$

Garų tankis:

$$\rho_g = 21,713 \text{ kg/m}^3$$

Garų dinaminis klampis:

$$\mu_g = 8,345 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Šalčio našumas, atitinkantis perkaitinimą šilumokaityje:

$$Q_0 = 1,497 \text{ kW}$$

Entalpija išmetime iš kompresoriaus:

$$h_{disch} = 743,5 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija skysčio išėjime iš kondensatoriaus:

$$h_{c-disch} = 270,6 \text{ kJ/kg}$$

Perskaičiuojamas suvartojamas galingumas, žinant kompresoriaus masinį debitą:

$$\dot{W}_{km} = \dot{m}_{R290}(h_2 - h_1) = 0,0044 \cdot (743,5 - 607,3) = 0,490 \text{ kW}$$

Masinis debitas kondensatoriuje:

$$\dot{m}_c = \frac{Q_0 + \dot{W}_{km}}{h_{disch} - h_{c-disch}} = \frac{1,497 + 0,490}{743,5 - 270,6} = 0,0042 \text{ kg/s}$$

Vienos eigos masinis debitas:

$$\dot{m}_{c1} = \frac{\dot{m}_c}{5} = \frac{0,0042}{5} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Vamzdelio skerspjūvio plotas:

$$A_{cond,p} = \frac{\pi D_{cond}^2}{4} = \frac{0,0045^2 \pi}{4} = 1,590 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Masės srautas:

$$G_{cond} = \frac{\dot{m}_{c1}}{A_{cond,p}} = \frac{8,4 \cdot 10^{-5}}{1,590 \cdot 10^{-5}} = 52,253 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Kondensacijos diapazoną padalinus į lygias dalis ( $x = 0,1 \text{ kg/kg}$  iki  $x = 0,9 \text{ kg/kg}$ ) su kiekvienu elementu skaičiuojami koreliacijos parametrai.

Reynolds'o skaičius tik skysčiui:

$$Re_{c,lo} = \frac{G_{cond} D_{cond}}{\mu_{lc}} = \frac{52,253 \cdot 0,0045}{9,513 \cdot 10^{-5}} = 2471$$

Weber'io skaičius:

$$We_{c1} = \frac{G_{cond}^2 D_{cond}}{\sigma \rho_{lc}} = \frac{52,253^2 \cdot 0,0045}{0,0068 \cdot 489} = 3,702$$

Parametras E2:

$$E_2 = 1,578 We_{c1} Re_{c,lo}^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 3,702 \cdot 2471^{-0,51} \cdot \left( \frac{489}{21,713} \right)^{-0,08} = 0,0015$$

Likę apskaičiuoti parametrai surašomi į 2.6 lentelę.

## 2.6 lentelė. Kondensacijos diapazono parametrai (R290)

<i>x</i>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\varepsilon_{c,hom}$	0,715	0,849	0,906	0,937	0,956	0,971	0,981	0,989	0,995
<i>Y</i>	2,503	5,632	9,656	15,020	22,530	33,795	52,571	90,121	202,772
$Re_{c,l}$	2225	1977	1730	1483	1236	988	741	494	247
$E_1$	0,724	0,740	0,759	0,782	0,809	0,844	0,892	0,963	1,099
$S_{c,1}$	2,142	2,748	3,341	3,995	4,778	5,789	7,227	9,589	14,729
$\varepsilon_{c,v}$	0,538	0,672	0,743	0,789	0,825	0,854	0,879	0,904	0,932
$A_g,$ $10^{-4}m^2$	0,086	0,107	0,118	0,126	0,132	0,136	0,140	0,144	0,148
$A_s,$ $10^{-5}m^2$	0,735	0,522	0,409	0,334	0,278	0,233	0,192	0,153	0,107
$M_{c,s1},$ <i>kg</i>	0,1003								
$M_{g,s1},$ <i>kg</i>	0,0126								

Taigi, šaldymo agento kiekis kondensatoriaus vamzdyje:

$$M_{R290_{cond}}^{+27^{\circ}C} = M_{c,s1} + M_{g,s1} = 0,1003 + 0,0126 = 0,1129 \text{ kg}$$

Priimama, kad garo ir skysčio kolektorių tūris lygus viso kondensatoriaus tūrio (1 L) ir skaičiuojamo vamzdelio tūrio (0,785 L) skirtumui. Dozė perkaitinto garo kolektoriuje nevertinama. Tada agento kiekis vien tik skysčio kolektoriuje:

$$M_{R290_{col}}^{+27^{\circ}C} = \rho_l^{+27^{\circ}C} \cdot V_{col} = 489,2 \cdot 1,075 \cdot 10^{-4} = 0,0526 \text{ kg}$$

Bendras R1270 kiekis kondensatoriuje, kai kondensacijos temperatūra 27°C:

$$M_{R290_{cond}} = 0,1129 + 0,0526 = 0,1655 \text{ kg}$$

Bendras R290 kiekis garintuve ir kondensatoriuje:

$$M_{R290_{ev+cond}} = 0,2902 + 0,1655 = 0,4557 \text{ kg}$$

Dozės garintuve ir kondensatoriuje skirtumas su R507A:

$$\Delta M = M_{R507A_{ev+cond}} - M_{R290_{ev+cond}} = 1,399 - 0,4557 = 0,9433 \text{ kg}$$

Matyti, kad lyginant su R507A šaldymo agentu, propano dozė garintuve ir kondensatoriuje esant nominalioms sąlygoms gaunama 0,9433 kg žemesnė. Didelė to priežastis – R290 pasižymi daug mažesniu tankiu palyginus su R507A (žr. 1.2 lentelę). Dar svarbu paminėti, kad didelę įtaką dozės sumažėjimui daro ir propano sistemoje naudojamas mažesnio tūrio kondensatorius.

### 2.2.3. R290 dozė resiveryje

Toliau tęsiant skaičiavimus, reikia įvertinti šaldymo agento kiekį resiveryje. Anksčiau, kai šaldymo agento dozė nebūdavo prioritetas, esminis resiverio parinkimo principas buvo jų pakankamo dydžio

(kad sistemos veikimo metu resiveris pilnai neužsipildytų arba visiškai neištuštėtų) užtikrinimas. Kita vertus, visiškas resiverio užpildymas skysčiu nekels problemų, jeigu resiveris negali būti atjungtas nuo kondensatoriaus (tarp resiverio ir kondensatoriaus nėra jokio vožtuvo). Normalaus sistemos darbo metu, resiveris turi kompensuoti tik dozės kitimą garintuve. Šaldymo sistemas aptarnaujantys technikai paprastai taip pat nori turėti galimybę nuvaryti visą dozę iš žemo slėgio pusės į aukšto slėgio pusę. Tokiu atveju skystas šaldymo agentas gali būti laikomas ne tik resiveryje, bet ir kondensatoriuje, t.y. bendras resiverio ir kondensatoriaus tūris turėtų būti pakankamas talpinti visai sistemos šaldymo agento dozei. Taip pat laikoma, kad visam skysčiui ištekėti iš resiverio neleistina, kadangi tokiu atveju atsiranda neigiamas poveikis valdymo vožtuvams. Jeigu sistemoje naudojamas skysčio - garo linijos šilumokaitis, didelė garo dalis gali susikondensuoti skysčio linijoje, todėl jokio poveikio vožtuvams nėra.

Šiuo atveju, vadovaujamosi rekomendacija, kuri teigia, kad bent 1/6 viso resiverio tūrio turėtų būti užpildyta skysčiu. Tokiu atveju išvengiama nepilnos kondensacijos.

Priimama, kad analizuojamoje sistemoje su R290 naudojamas 1 L resiveris. Tada, resiverio tūris skysčiui:

$$V_l = 1 \cdot \frac{1}{6} = 0,16667 \cdot 10^{-3} = 1,6667 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Resiverio tūris garui:

$$V_v = 1 \cdot \frac{5}{6} = 0,83333 \cdot 10^{-3} = 8,3333 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Skysčio tankis, kai temperatūra lygi kondensacijos temperatūrai:

$$\rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 489,2 \text{ kg/m}^3$$

Atitinkamai, garo tankis:

$$\rho_v^{+27^\circ\text{C}} = 21,7 \text{ kg/m}^3$$

Žinant tankį bei tūrį galima apskaičiuoti masę:

$$m = V \cdot \rho \tag{2.2.1}$$

Taigi, skysčio masė resiveryje:

$$m_l = V_l \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot 489,2 = 0,0815 \text{ kg}$$

Analogiškai randama garo masė:

$$m_v = V_v \cdot \rho_v^{+27^\circ\text{C}} = 8,3333 \cdot 10^{-4} \cdot 21,7 = 0,0181 \text{ kg}$$

Tada visas šaldymo agento (R290) kiekis resiveryje:

$$m_{res} = m_l + m_v = 0,0815 + 0,0181 = 0,0996 \text{ kg}$$

## 2.2.4. R290 dozė skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose

Skysčio linijos ilgis  $L = 5,5$  m; vamzdelis  $\varnothing 6 \times 1$ .

Skaičiuojamas vamzdelio tūris:

$$V_{sk} = \pi r^2 \cdot L = \pi \cdot 0,004^2 \cdot 5,5 = 6,912 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Tada šaldymo agento kiekis vamzdelyje:

$$m_{sk} = V_{sk} \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 6,912 \cdot 10^{-5} \cdot 489,2 = 0,0338 \text{ kg}$$

Filtre – sausintuve esantis šaldymo agento kiekis nusakomas kaip užpildytas skysčio gaubto ir branduolio tūrių skirtumas ( $V_f = 0,00015 \text{ m}^3$ ). Tada:

$$m_f = V_f \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 0,00015 \cdot 489,2 = 0,0733 \text{ kg}$$

## 2.3. R290 dozės perskaičiavimas (maksimalios sąlygos)

Ankstesniame poskyryje paskaičiuota propano dozė esant nominalioms sąlygoms, kai aplinkos temperatūra  $20^\circ\text{C}$  (atitinkamai kondensacijos temperatūra  $27^\circ\text{C}$ ). Tačiau, šaldytuvas tai pat turėtų sugebėti atšaldyti ir esant  $38^\circ\text{C}$  aplinkos temperatūrai, kai kondensacijos temperatūra pakyla iki  $55^\circ\text{C}$ . Dėl šios priežasties šaldymo agento R290 kiekis sistemoje perskaičiuojamas esant šioms sąlygoms.

### 2.3.1. R290 dozės garintuve perskaičiavimas

Priimamos sąlygos - kondensacijos temperatūra  $T_c = 55^\circ\text{C}$ ; virimo temperatūra atitinka 2 bar MOP nustatymą ir lygi  $T_0 = -25,5^\circ\text{C}$ .

Į kompresorių siurbiamų garų temperatūra perskaičiuojama, įvertinus 6 K perkaitimą:

$$T_1 = T_a + \varepsilon(T_3 - T_a) = -19,5 + 0,75 \cdot (55 + 19,5) = 36,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Šilumokaityje peraušinto skysčio temperatūrą taip pat reikia perskaičiuoti naujoms temperatūroms.

Siurbiamų garų entalpija:

$$h_1 = 647,1 \text{ kJ/kg}$$

Garų entalpija po perkaitimo:

$$h_a = 554,9 \text{ kJ/kg}$$

Iš kondensatoriaus išeinančio skysčio entalpija:

$$h'_3 = 352,2 \text{ kJ/kg}$$

Iš šilumokaičio ištekančio skysčio entalpija:

$$h_3 = h'_3 - (h_1 - h_a) = 352,2 - (647,1 - 554,9) = 260 \text{ kJ/kg}$$



Atitinkamai, skysčio temperatūra:

$$t_3 = 23,1^\circ\text{C}$$

Pagrindiniai R290 parametrai surašomi į lentelę:

**2.7 lentelė.** Pagrindiniai R290 parametrai, kai kondensacijos temperatūra 55°C, MOP 2bar.

$p_0, kPa$	$x, kg/kg$	$\rho_l, kg/m^3$	$\mu_l, Pa \cdot s$	$\sigma, N/m$	$\rho_g, kg/m^3$	$\mu_g, Pa \cdot s$
203,4	0,269	560,6	$1,632 \cdot 10^{-4}$	0,0134	4,630	$6,753 \cdot 10^{-6}$

Toliau perskaičiuojamas šalčio našumas ir masinis debitas. Kaip ir skaičiuojant dozę esant nominalioms sąlygoms, dėl jau anksčiau minėtų priežasčių šalčio našumas R290 prilyginamas sistemai su R507A. Užsidavus  $T_c = 55^\circ\text{C}$ , bei susidarius atitinkamą šaldymo ciklą su R507A agentui perskaičiuotomis temperatūromis (siurbiamų garų temperatūra 35°C), randamas masinis debitas:

$$\dot{m}_{R507A}^{+55^\circ\text{C}} = \dot{m}_{18,33} \cdot \frac{\rho_{35}}{\rho_{18,33}} = 0,0170 \cdot \frac{8,126}{8,652} = 0,016 \text{ kg/s}$$

Atitinkamai, perskaičiuotas šalčio našumas:

$$Q_{0R507A} = \left( \frac{Q_{18,33}}{\dot{m}_{18,33}} + h_1 - h_{18,33} \right) \cdot \dot{m}_\Sigma = \left( \frac{1,788}{0,017} + 400,6 - 385,7 \right) \cdot 0,016 = 1,917 \text{ kW}$$

Tada, masinis debitas propanui, kai kondensacijos temperatūra 55°C:

$$\dot{m}_{R290} = \frac{Q_{0R507A}}{(h_{1R290} - h_{4R290})} = \frac{1,917}{647,1 - 260} = 0,0049 \text{ kg/s}$$

**2.8 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (1)

$\frac{G_1, kg}{s \cdot m^2}$	$\frac{G_2, kg}{s \cdot m^2}$	$\epsilon_{nom}$	Y	$Re_{l0-1}$	$Re_{l0-2}$	$Re_{l-1}$	$Re_{l-2}$	$We_1$
16,407	20,509	0,981	50,801	1306	1633	920	1151	0,466

**2.9 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (2)

$We_2$	$E_{1-1}$	$E_{1-2}$	$E_{2-1}$	$E_{2-2}$	$S_1$	$S_2$	$\epsilon_{v1}$	$\epsilon_{v2}$
0,728	1,239	1,188	0,00022	0,00031	9,783	9,399	0,838	0,843

**2.10 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R290 (3)

$A_{g1}, m^2$	$A_{g2}, m^2$	$A_{s1}, m^2$	$A_{s2}, m^2$	$M_{s1}, kg$	$M_{s2}, kg$	$M_{g1}, kg$	$M_{g2}, kg$
0,000113	0,000112	0,000021	0,000021	0,1202	0,1452	0,0113	0,0143

Taigi, šaldymo agento kiekis garintuve, pirmoje šakoje:

$$M_{a1} = M_{s1} + M_{g1} = 0,1202 + 0,0113 = 0,1315 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis garintuve, antroje šakoje:

$$M_{a2} = M_{s2} + M_{g2} = 0,1452 + 0,0143 = 0,1595 \text{ kg}$$

Bendras šaldymo agento kiekis garintuve:

$$M_{\Sigma} = M_{a1} + M_{a2} = 0,1315 + 0,1595 = 0,291 \text{ kg}$$

### 2.3.2. R290 dozės kondensatoriuje perskaičiavimas

Suslėgimas izoentropinis. Užsiduodama iš kompresoriaus išmetamų garų temperatūra  $T_{disch_{R290}} = 123^{\circ}\text{C}$ . Randami reikalingi skysčio parametrai, kai kondensacijos temperatūra  $55^{\circ}\text{C}$ .

2.11 lentelė. Pagrindiniai R290 parametrai

$p_c, \text{kPa}$	$\rho_l, \text{kg/m}^3$	$\mu_l, \text{Pa} \cdot \text{s}$	$\sigma, \text{N/m}$	$\rho_g, \text{kg/m}^3$	$\mu_g, \text{Pa} \cdot \text{s}$
1907,2	438,8	$6,983 \cdot 10^{-4}$	0,0036	43,706	$9,697 \cdot 10^{-6}$

Šalčio našumas, atitinkantis perkaitinimą šilumokaityje:

$$Q_0 = 1,917 \text{ kW}$$

Entalpija išmetime iš kompresoriaus:

$$h_{disch} = 784,9 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija skysčio išėjime iš kondensatoriaus:

$$h_{c-disch} = 352,2 \text{ kJ/kg}$$

Perskaičiuojamas suvartojamas galinumas, žinant kompresoriaus masinį debitą:

$$\dot{W}_{km} = \dot{m}_{R290}(h_2 - h_1) = 0,0049 \cdot (784,9 - 647,1) = 0,676 \text{ kW}$$

Masinis debitas kondensatoriuje:

$$\dot{m}_c = \frac{Q_0 + \dot{W}_{km}}{h_{disch} - h_{c-disch}} = \frac{1,917 + 0,676}{784,9 - 352,2} = 0,006 \text{ kg/s}$$

Vienos eigos masinis debitas:

$$\dot{m}_{c1} = \frac{\dot{m}_c}{5} = \frac{0,006}{5} = 0,0012 \text{ kg/s}$$

Vamzdelio skerspjūvio plotas:

$$A_{cond,p} = \frac{\pi D_{cond}^2}{4} = \frac{0,0045^2 \pi}{4} = 1,590 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Masės srautas:

$$G_{cond} = \frac{\dot{m}_{c1}}{A_{cond,p}} = \frac{0,0012}{1,590 \cdot 10^{-5}} = 75,361 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Kondensacijos diapazonas dalinamas į lygias dalis ( $x = 0,1 \text{ kg/kg}$  iki  $x = 0,9 \text{ kg/kg}$ ). Visam diapazonui skaičiuojami koreliacijos parametrai.

Reynolds'o skaičius tik skysčiui:

$$Re_{c,lo} = \frac{G_{cond} D_{cond}}{\mu_{lc}} = \frac{75,361 \cdot 0,0045}{6,983 \cdot 10^{-5}} = 4856$$

Weber'io skaičius:

$$We_{c1} = \frac{G_{cond}^2 D_{cond}}{\sigma \rho_l} = \frac{75,361^2 \cdot 0,0045}{0,0036 \cdot 438,8} = 16,164$$

Parametras E2:

$$E_2 = 1,578 We_{c1} Re_{c,lo}^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 16,164 \cdot 4856^{-0,51} \cdot \left( \frac{438,8}{43,706} \right)^{-0,08} = 0,0048$$

Likę apskaičiuoti parametrai surašomi į lentelę.

**2.12 lentelė.** Kondensacijos diapazono parametrai (R290)

<i>x</i>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
$\varepsilon_{c,hom}$	0,527	0,715	0,811	0,870	0,909	0,937	0,959	0,975	0,989
Y	1,115	2,509	4,302	6,692	10,039	15,058	23,424	40,155	90,350
$Re_{c,l}$	4371	3885	3996	2914	2483	1942	1457	971	486
$E_1$	0,533	0,545	0,559	0,575	0,596	0,622	0,657	0,709	0,809
$S_{c,1}$	1,560	1,856	2,145	2,462	2,839	3,323	4,004	5,101	7,394
$\varepsilon_{c,v}$	0,416	0,575	0,667	0,731	0,779	0,819	0,854	0,887	0,924
$A_g,$ $10^{-4} m^2$	0,066	0,091	0,106	0,116	0,124	0,130	0,136	0,141	0,147
$A_s,$ $10^{-5} m^2$	0,927	0,676	0,529	0,428	0,350	0,287	0,2322	0,1793	0,120
$M_{c,s1},$ <i>kg</i>	0,1051								
$M_{g,s1},$ <i>kg</i>	0,0239								

Taigi, šaldymo agento kiekis kondensatoriaus vamzdelyje:

$$M_{R290_{cond}}^{+55^{\circ}C} = M_{c,s1} + M_{g,s1} = 0,1051 + 0,0239 = 0,1290 \text{ kg}$$

Įvertinamas skysčio kiekis kondensatoriaus kolektoriuje:

$$M_{R290_{col}}^{+55^{\circ}C} = \rho_l^{+55^{\circ}C} \cdot V_{col} = 438,7 \cdot 1,075 \cdot 10^{-4} = 0,0472 \text{ kg}$$

Bendras R290 kiekis kondensatoriuje, kai kondensacijos temperatūra 55°C:

$$M_{R290_{cond}} = 0,1290 + 0,0472 = 0,1762 \text{ kg}$$

### 2.3.3. R290 dozės resiveryje perskaičiavimas

Skysčio tankis, kai temperatūra lygi kondensacijos temperatūrai:

$$\rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 438,7 \text{ kg/m}^3$$

Atitinkamai, garo tankis:

$$\rho_v^{+55^\circ\text{C}} = 43,7 \text{ kg/m}^3$$

Taigi, skysčio masė resiveryje:

$$m_l = V_l \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot 438,7 = 0,0731 \text{ kg}$$

Analogiškai randama garo masė:

$$m_v = V_v \cdot \rho_v^{+27^\circ\text{C}} = 8,3333 \cdot 10^{-4} \cdot 43,7 = 0,0364 \text{ kg}$$

Tada visas šaldymo agento (R290) kiekis resiveryje:

$$m_{res} = m_l + m_v = 0,0731 + 0,0364 = 0,1095 \text{ kg}$$

### 2.3.4. R290 dozės skysčio linijoje perskaičiavimas

Šaldymo agento kiekis skysčio linijoje:

$$m_{sk} = V_{sk} \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 6,912 \cdot 10^{-5} \cdot 438,7 = 0,0303 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis filtre-sausintuve:

$$m_f = V_f \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 0,00015 \cdot 438,7 = 0,0658 \text{ kg}$$

## 2.4. Propilenas (R1270) kaip alternatyva propanui (R290)

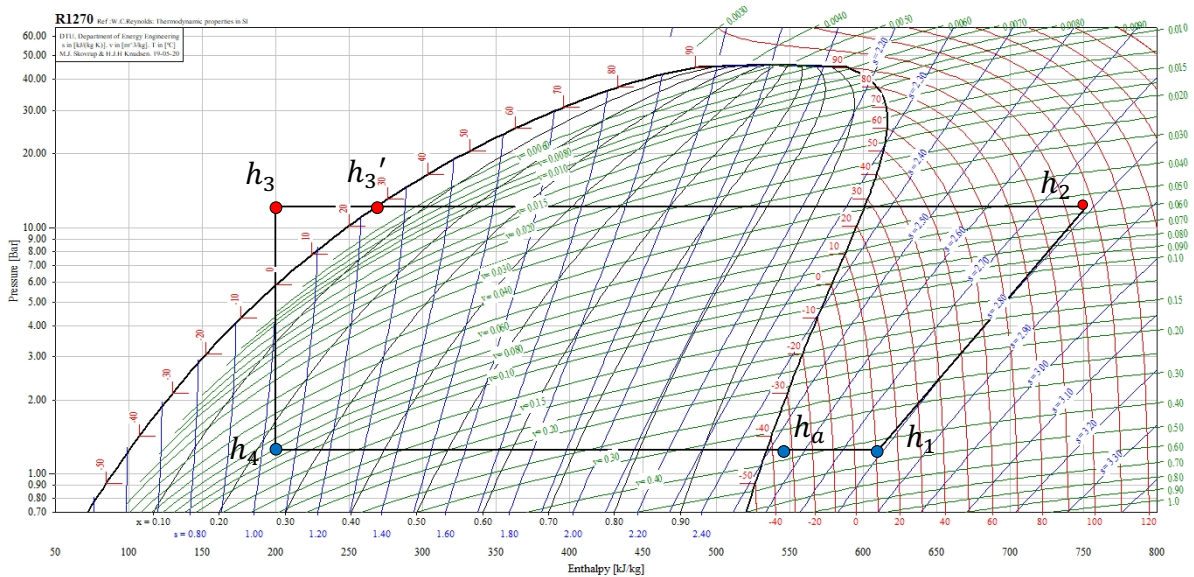
Jau kurį laiką susidomėjimas propilenu (R1270) vis didėja. Šis šaldymo agentas pasižymi didesniu tūrinium šaldymo našumu bei žemesne virimo temperatūra lyginant su propanu (R290). Kita vertus reikia įvertinti ir apie 20% didesnius slėgius bei aukštesnę išmetamų garų temperatūrą - tai riboja panaudojimo diapazoną. Medžiagų suderinamumas su propilenu beveik identiškas propanui, todėl sistemose leistina naudoti vienodus tepalus.

Propilenas, kaip ir propanas yra degus ir priklauso A3 šaldymo agentų grupei – jam taikomi tie patys saugumo reikalavimai.

Dėl dvigubo cheminio ryšio šis agentas yra gana reaktyvus, o tai reiškia, kad atsiranda polimerizacijos rizika esant aukštam slėgiui bei temperatūrai. Vis dėlto, hidrokarboninių šaldymo agentų gamintojų bei vartotojų atlikti bandymai rodo, kad šaldymo sistemose reaktyvumas beveik neegzistuoja. Kartais kai kuriose literatūros šaltiniuose buvo paminėta abejonių dėl galimo propileno kancerogeninio poveikio, tačiau šios prielaidos visiškai paneigtos įvairiais tyrimais.

### 2.4.1. R1270 dozė garintuve

Pradiniai duomenys lieka tokie patys kaip ir skaičiuojant R290. Sąlygos atitinkamai nominalios - kondensacijos temperatūra  $T_c = 27^\circ\text{C}$ ; virimo temperatūra  $T_0 = -43^\circ\text{C}$ ; siurbiamų garų temperatūra  $T_{suc} = 11^\circ\text{C}$ .



2.5 pav. R1270 šaldymo ciklas (nominalios sąlygos)

Braižomas šaldymo ciklas (2.5 pav.). Lyginant R1270 ciklo būsenos taškų parametrus su R290, matyti, kad esant  $T_c = 27^\circ\text{C}$  kondensacijos temperatūrai, propileno slėgis apytikriai 21% didesnis nei propano. Analogiškai, virimo slėgis didesnis  $\sim 28\%$ . Toliau Apskaičiuojama siurbiamų garų temperatūra. Kaip ir anksčiau, pirmiausia randamos reikalingos entalpijos. Taigi, siurbiamiems propileno garams:

$$h_1 = 611 \text{ kJ/kg}$$

Po perkaitimo:

$$h_a = 542 \text{ kJ/kg}$$

Iš kondensatoriaus išeinančio skysto propileno entalpija:

$$h'_3 = 269 \text{ kJ/kg}$$

Iš šilumokaičio ištekiančio skysčio entalpiją:

$$h_3 = h'_3 - (h_1 - h_a) = 269 - (611 - 542) = 200 \text{ kJ/kg}$$

Pasinaudojant REFPROP duomenų baze, apskaičiuojami būsenos taškai:

$$p_3 = 1213,0 \text{ kPa}; t_3 = -0,09^\circ\text{C}$$

Būsenos parametrai surašomi į lentelę:

2.13 lentelė. Būsenos taškų parametrai (R1270)

$p_0, \text{kPa}$	$x, \text{kg/kg}$	$\rho_l, \text{kg/m}^3$	$\mu_l, \text{Pa} \cdot \text{s}$	$\sigma, \text{N/m}$	$\rho_g, \text{kg/m}^3$	$\mu_g, \text{Pa} \cdot \text{s}$
124,41	0,230	604,3	$1,862 \cdot 10^{-4}$	0,0161	2,855	$6,489 \cdot 10^{-6}$

Išreiškiamas masinis debitas kompresoriuje sistemai su R1270:

$$\dot{m}_{R1270} = \frac{Q_{0R507A}}{(h_{1R1270} - h_{4R1270})} = \frac{1,497}{611 - 200} = 0,0036 \text{ kg/s}$$

Kiti apskaičiuoti koreliacijos parametrai surašomi į lenteles.

**2.14 lentelė.** Koreliacijos parametrai R1270 (1)

$\frac{G_1, \text{ kg}}{s \cdot m^2}$	$\frac{G_2, \text{ kg}}{s \cdot m^2}$	$\epsilon_{hom}$	Y	$Re_{l0-1}$	$Re_{l0-2}$	$Re_{l-1}$	$Re_{l-2}$	$We_1$
12,054	15,067	0,985	63,678	841	1052	646	808	0,194

**2.15 lentelė.** Koreliacijos parametrai R1270 (2)

$We_2$	$E_{1-1}$	$E_{1-2}$	$E_{2-1}$	$E_{2-2}$	$S_1$	$S_2$	$\epsilon_{v1}$	$\epsilon_{v2}$
0,303	1,498	1,436	0,00012	0,00015	12,916	12,405	0,831	0,837

**2.16 lentelė.** Koreliacijos parametrai R1270 (3)

$A_{g1}, m^2$	$A_{g2}, m^2$	$A_{s1}, m^2$	$A_{s2}, m^2$	$M_{s1}, \text{ kg}$	$M_{s2}, \text{ kg}$	$M_{g1}, \text{ kg}$	$M_{g2}, \text{ kg}$
0,000111	0,000112	0,000022	0,000021	0,1353	0,1635	0,0069	0,0087

Šaldymo agento kiekis garintuve, pirmoje šakoje:

$$M_{a1} = M_{s1} + M_{g1} = 0,1353 + 0,0069 = 0,1422 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis garintuve, antroje šakoje:

$$M_{a2} = M_{s2} + M_{g2} = 0,1635 + 0,0087 = 0,1683 \text{ kg}$$

Bendras šaldymo agento kiekis garintuve:

$$M_{\Sigma_e} = M_{a1} + M_{a2} = 0,1422 + 0,1683 = 0,3144 \text{ kg}$$

#### 2.4.2. R1270 dozė kondensatoriuje

Skaičiuojama agento dozė kondensatoriuje. Lyginant izoentropinį R1270 šaldymo ciklą (pav. 2.5) su R290 (pav. 2.4) matyti, kad iš kompresoriaus išmetamų propileno garų temperatūra yra aukštesnė už propano ~13% ir lygi  $T_{dischR1270} = 103^\circ\text{C}$ .

**2.17 lentelė.** Garo ir skysčio parametrai R1270

$p_c, \text{ kPa}$	$\rho_l, \text{ kg/m}^3$	$\mu_l, \text{ Pa} \cdot \text{ s}$	$\sigma, \text{ N/m}$	$\rho_g, \text{ kg/m}^3$	$\mu_g, \text{ Pa} \cdot \text{ s}$
1213,0	502,8	$9,413 \cdot 10^{-4}$	0,0067	25,671	$9,009 \cdot 10^{-6}$

Šalčio našumas:

$$Q_0 = 1,497 \text{ kW}$$

Entalpija išmetime iš kompresoriaus:

$$h_{dischR1270} = 753,7 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija skysčio išėjime iš kondensatoriaus:

$$h_{c-dischR1270} = 269,1 \text{ kJ/kg}$$

Perskaičiuojamas suvartojamas galingumas, žinant kompresoriaus masinį debitą:

$$\dot{W}_{kmR1270} = \dot{m}_{R1270}(h_2 - h_1) = 0,0043 \cdot (753,7 - 611) = 0,6136 \text{ kW}$$

Masinis debitas kondensatoriuje:

$$\dot{m}_{cR1270} = \frac{Q_0 + \dot{W}_{kmR1270}}{h_{dischR1270} - h_{c-dischR1270}} = \frac{1,497 + 0,6136}{753,7 - 269,1} = 0,0044 \text{ kg/s}$$

Masės srautas:

$$G_{condR1270} = \frac{\dot{m}_{c1}}{A_{cond,p}} = \frac{(0,0044/5)}{1,590 \cdot 10^{-5}} = 54,764 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Skaičiuojami Premoli koreliacijos parametrai kai kondensacijos diapazonas padalintas į lygias dalis ( $x = 0,1 \text{ kg/kg}$  iki  $x = 0,9 \text{ kg/kg}$ ) ir rezultatai surašomi į lentelę.

**2.18 lentelė.** Kondensacijos diapazono parametrai R1270

$x$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\varepsilon_{c,hom}$	0,685	0,830	0,894	0,929	0,951	0,967	0,978	0,987	0,994
Y	2,176	4,896	8,394	13,057	19,586	29,379	45,701	78,344	176,275
$Re_{c,lo-1}$	2618,1								
$Re_{c,l}$	2356	2095	1832	1571	1309	1047	785	523	262
We	4,002								
$E_1$	0,694	0,710	0,728	0,750	0,776	0,810	0,855	0,924	1,054
$E_2$	0,0016								
$S_{c,1}$	2,021	2,556	3,095	3,680	4,382	5,290	6,584	8,715	13,386
$\varepsilon_{c,v}$	0,519	0,656	0,731	0,780	0,817	0,847	0,874	0,899	0,929
$A_g,$ $10^{-4} \text{m}^2$	0,082	0,104	0,116	0,124	0,130	0,135	0,139	0,143	0,148
$A_s,$ $10^{-5} \text{m}^2$	0,766	0,546	0,428	0,349	0,290	0,242	0,200	0,159	0,112
$M_{c,s1},$ kg	0,1060								
$M_{g,s1},$ kg	0,0148								

Taigi, šaldymo agento kiekis kondensatoriaus vamzdyje:

$$M_{R1270_{cond}}^{+27^\circ\text{C}} = M_{c,s1} + M_{g,s1} = 0,1060 + 0,0148 = 0,1208 \text{ kg}$$

Įvertinamas skysčio kiekis kondensatoriaus kolektoriuje:

$$M_{R1270_{col}}^{+27^\circ\text{C}} = \rho_l^{+27^\circ\text{C}} \cdot V_{col} = 502,8 \cdot 1,075 \cdot 10^{-4} = 0,054 \text{ kg}$$

Bendras R1270 kiekis kondensatoriuje, kai kondensacijos temperatūra 27°C:

$$M_{R1270_{cond}} = 0,1208 + 0,054 = 0,1748 \text{ kg}$$

### 2.4.3. R1270 dozė resiveryje

Kaip ir propano sistemoje, priimama, kad naudojamas 1 L talpos resiveris. Skysčio tankis, kai temperatūra lygi kondensacijos temperatūrai:

$$\rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 502,8 \text{ kg/m}^3$$

Atitinkamai, garo tankis:

$$\rho_v^{+27^\circ\text{C}} = 25,7 \text{ kg/m}^3$$

Taigi, skysčio masė resiveryje:

$$m_l = V_l \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot 502,8 = 0,0838 \text{ kg}$$

Analogiškai randama garo masė:

$$m_v = V_v \cdot \rho_v^{+27^\circ\text{C}} = 8,3333 \cdot 10^{-4} \cdot 25,7 = 0,0214 \text{ kg}$$

Tada visas šaldymo agento (R1270) kiekis resiveryje:

$$m_{res} = m_l + m_v = 0,0838 + 0,0214 = 0,1052 \text{ kg}$$

### 2.4.4. R1270 dozė skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose

Šaldymo agento kiekis skysčio linijoje:

$$m_{sk} = V_{sk} \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 6,912 \cdot 10^{-5} \cdot 502,8 = 0,0348 \text{ kg}$$

Filtre – sausintuve esantis šaldymo agento kiekis nusakomas kaip užpildytas skysčio gaubto ir branduolio tūrių skirtumas ( $V_f = 0,00015 \text{ m}^3$ ). Tada:

$$m_f = V_f \cdot \rho_l^{+27^\circ\text{C}} = 0,00015 \cdot 502,8 = 0,0754 \text{ kg}$$

## 2.5. Propileno (R1270) dozės perskaičiavimas (maksimalios sąlygos)

### 2.5.1. R1270 dozės garintuve perskaičiavimas

Priimamos sąlygos - kondensacijos temperatūra  $T_c = 55^\circ\text{C}$ ; virimo temperatūra atitinka 2 bar MOP nustatymą ir propilenui lygi  $T_0 = -31,5^\circ\text{C}$ .

Į kompresorių siurbiamų garų temperatūra po 6 K perkaitimo:

$$T_1 = T_a + \varepsilon(T_3 - T_a) = -25,5 + 0,75 \cdot (55 + 25,5) = 34,9^\circ\text{C}$$



Šilumokaityje peraušinto skysčio temperatūrą taip pat reikia perskaičiuoti naujoms temperatūroms. Siurbiamų garų entalpija:

$$h_1 = 646,3 \text{ kJ/kg}$$

Garų entalpija po perkaitimo:

$$h_a = 554,8 \text{ kJ/kg}$$

Iš kondensatoriaus išeinančio skysčio entalpija:

$$h'_3 = 349,6 \text{ kJ/kg}$$

Iš šilumokaičio ištekiančio skysčio entalpija:

$$h_3 = h'_3 - (h_1 - h_a) = 349,6 - (646,3 - 554,8) = 258,1 \text{ kJ/kg}$$

Atitinkamai, skysčio temperatūra:

$$t_3 = 22,8^\circ\text{C}$$

**2.19 lentelė.** R1270 parametrai

$p_0, \text{kPa}$	$x, \text{kg/kg}$	$\rho_l, \text{kg/m}^3$	$\mu_l, \text{Pa} \cdot \text{s}$	$\sigma, \text{N/m}$	$\rho_g, \text{kg/m}^3$	$\mu_g, \text{Pa} \cdot \text{s}$
199,6	0,314	589,6	$1,649 \cdot 10^{-4}$	0,0145	4,440	$6,821 \cdot 10^{-6}$

Toliau perskaičiuojamas šalčio našumas ir masinis debitas. Šalčio našumas R1270 prilyginamas sistemai su R507A, kai  $T_c = 55^\circ\text{C}$ . Taigi:

$$Q_{0R507A} = 1,917 \text{ kW}$$

Tada masinis debitas propilenui, kondensacijos temperatūra esant  $55^\circ\text{C}$ :

$$\dot{m}_{R1270}^{+55^\circ\text{C}} = \frac{Q_{0R507A}}{(h_{1R290} - h_{4R290})} = \frac{1,917}{646,3 - 258,1} = 0,0049 \text{ kg/s}$$

**2.20 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (1)

$\frac{G_1, \text{kg}}{s \cdot \text{m}^2}$	$\frac{G_2, \text{kg}}{s \cdot \text{m}^2}$	$\epsilon_{hom}$	Y	$Re_{l0-1}$	$Re_{l0-2}$	$Re_{l-1}$	$Re_{l-2}$	$We_1$
16,407	20,509	0,984	60,738	1292	1616	887	1108	0,410

**2.21 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (2)

$We_2$	$E_{1-1}$	$E_{1-2}$	$E_{2-1}$	$E_{2-2}$	$S_1$	$S_2$	$\epsilon_{v1}$	$\epsilon_{v2}$
0,641	1,273	1,221	0,00019	0,00027	10,867	10,435	0,848	0,853

**2.22 lentelė.** Perskaičiuoti koreliacijos parametrai R1270 (3)

$A_{g1}, \text{m}^2$	$A_{g2}, \text{m}^2$	$A_{s1}, \text{m}^2$	$A_{s2}, \text{m}^2$	$M_{s1}, \text{kg}$	$M_{s2}, \text{kg}$	$M_{g1}, \text{kg}$	$M_{g2}, \text{kg}$
0,000112	0,000113	0,000020	0,000019	0,1188	0,1434	0,0109	0,0137

Taigi, šaldymo agento kiekis garintuvo pirmoje šakoje:

$$M_{a1} = M_{s1} + M_{g1} = 0,1188 + 0,0109 = 0,1297 \text{ kg}$$

Šaldymo agento kiekis garintuvo antroje šakoje:

$$M_{a2} = M_{s2} + M_{g2} = 0,1434 + 0,0137 = 0,1571 \text{ kg}$$

Bendras šaldymo agento kiekis garintuve:

$$M_{R1270_{ev}}^{+55^{\circ}\text{C}} = M_{a1} + M_{a2} = 0,1297 + 0,1571 = 0,2868 \text{ kg}$$

## 2.5.2. R1270 dozės kondensatoriuje perskaičiavimas

Suslėgimas izoentropinis. Užsiduodama iš kompresoriaus išmetamų garų temperatūra  $T_{disch_{R1270}} = 143^{\circ}\text{C}$ . Randami reikalingi skysčio parametrai, kai kondensacijos temperatūra  $55^{\circ}\text{C}$ .

2.23 lentelė. Pagrindiniai R1270 parametrai

$p_c, \text{kPa}$	$\rho_l, \text{kg/m}^3$	$\mu_l, \text{Pa} \cdot \text{s}$	$\sigma, \text{N/m}$	$\rho_g, \text{kg/m}^3$	$\mu_g, \text{Pa} \cdot \text{s}$
2281,9	446,1	$7,090 \cdot 10^{-4}$	0,0034	51,916	$1,098 \cdot 10^{-5}$

Šalčio našumas, atitinkantis perkaitinimą šilumokaityje:

$$Q_0 = 1,917 \text{ kW}$$

Entalpija išmetime iš kompresoriaus:

$$h_{disch} = 809,8 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija skysčio išėjime iš kondensatoriaus:

$$h_{c-disch} = 349,6 \text{ kJ/kg}$$

Perskaičiuojamas suvartojamas galingumas, žinant kompresoriaus masinį debitą:

$$\dot{W}_{km} = \dot{m}_{R1270}^{+55^{\circ}\text{C}} (h_2 - h_1) = 0,0049 \cdot (809,8 - 646,3) = 0,801 \text{ kW}$$

Masinis debitas kondensatoriuje:

$$\dot{m}_c = \frac{Q_0 + \dot{W}_{km}}{h_{disch} - h_{c-disch}} = \frac{1,917 + 0,801}{809,8 - 349,6} = 0,0059 \text{ kg/s}$$

Vamzdelio skerspjūvio plotas:

$$A_{cond,p} = \frac{\pi D_{cond}^2}{4} = \frac{0,0045^2 \pi}{4} = 1,590 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Masės srautas:

$$G_{cond} = \frac{\dot{m}_{c1}}{A_{cond,p}} = \frac{(0,0059/5)}{1,590 \cdot 10^{-5}} = 74,275 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Koreliacijos parametrai, kai kondensacijos diapazonas padalintas į lygias dalis ( $x = 0,1 \text{ kg/kg}$  iki  $x = 0,9 \text{ kg/kg}$ ).

Reynolds'o skaičius tik skysčiui:

$$Re_{c,lo} = \frac{G_{cond} D_{cond}}{\mu_{lc}} = \frac{74,275 \cdot 0,0045}{7,090 \cdot 10^{-5}} = 4714$$

Weber'io skaičius:

$$We_{c1} = \frac{G_{cond}^2 D_{cond}}{\sigma \rho_l} = \frac{74,275^2 \cdot 0,0045}{0,0034 \cdot 446,1} = 16,406$$

Parametras E2:

$$E_2 = 1,578 We_{c1} Re_{c,lo}^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,08} = 1,578 \cdot 16,406 \cdot 4714^{-0,51} \cdot \left( \frac{446,1}{51,9} \right)^{-0,08} = 0,005$$

Likę apskaičiuoti parametrai surašomi į lentelę.

**2.24 lentelė.** Perskaičiuoti kondensacijos diapazono parametrai (R1270)

<i>x</i>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
$\varepsilon_{c,hom}$	0,488	0,682	0,786	0,851	0,896	0,928	0,952	0,972	0,987
Y	0,955	2,148	3,683	5,729	8,593	12,891	20,052	34,375	77,343
$Re_{c,l}$	4242	3771	3300	2828	2367	1885	1414	942	471
$E_1$	0,518	0,529	0,543	0,559	0,579	0,604	0,638	0,689	0,786
$S_{c,1}$	1,503	1,770	2,036	2,317	2,658	3,097	3,716	4,720	6,845
$\varepsilon_{c,v}$	0,388	0,548	0,644	0,712	0,764	0,806	0,843	0,879	0,918
$A_g,$ $10^{-4} m^2$	0,062	0,0872	0,103	0,113	0,1215	0,1282	0,134	0,398	0,146
$A_s,$ $10^{-5} m^2$	0,972	0,718	0,565	0,458	0,375	0,308	0,2487	0,192	0,1293
$M_{c,s1},$ <i>kg</i>	0,1116								
$M_{g,s1},$ <i>kg</i>	0,0279								

Taigi, šaldymo agento kiekis kondensatoriaus vamzdelyje:

$$M_{R1270_{cond}}^{+55^{\circ}C} = M_{c,s1} + M_{g,s1} = 0,1116 + 0,0279 = 0,1395 \text{ kg}$$

Įvertinamas skysčio kiekis kondensatoriaus kolektoriuje:

$$M_{R1270_{col}}^{+55^{\circ}C} = \rho_l^{+55^{\circ}C} \cdot V_{col} = 446,2 \cdot 1,075 \cdot 10^{-4} = 0,048 \text{ kg}$$

Bendras R1270 kiekis kondensatoriuje, kai kondensacijos temperatūra 55°C:

$$M_{R1270_{cond}} = 0,1395 + 0,048 = 0,1875 \text{ kg}$$

### 2.5.3. R1270 dozės resiveryje perskaičiavimas

Skysčio tankis 1 L resiveryje, kai temperatūra lygi kondensacijos temperatūrai:

$$\rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 446,2 \text{ kg/m}^3$$

Atitinkamai, garo tankis:

$$\rho_v^{+55^\circ\text{C}} = 51,9 \text{ kg/m}^3$$

Taigi, skysčio masė resiveryje:

$$m_l = V_l \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot 446,2 = 0,0744 \text{ kg}$$

Analogiškai randama garo masė:

$$m_v = V_v \cdot \rho_v^{+55^\circ\text{C}} = 8,3333 \cdot 10^{-4} \cdot 51,9 = 0,0433 \text{ kg}$$

Tada visas šaldymo agento (R1270) kiekis resiveryje:

$$m_{res} = m_l + m_v = 0,0744 + 0,0433 = 0,1176 \text{ kg}$$

### 2.5.4. R1270 dozės perskaičiavimas skysčio linijoje ir likusiuose komponentuose

Šaldymo agento kiekis skysčio linijoje:

$$m_{sk} = V_{sk} \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 6,912 \cdot 10^{-5} \cdot 446,2 = 0,0308 \text{ kg}$$

Filtre – sausintuve esantis šaldymo agento kiekis ( $V_f = 0,00015 \text{ m}^3$ ).

$$m_f = V_f \cdot \rho_l^{+55^\circ\text{C}} = 0,00015 \cdot 446,2 = 0,0669 \text{ kg}$$

## 2.6. Skaičiavimo rezultatų apibendrinimas

Dozės skaičiavimo rezultatai su R290, R1270 šaldymo agentais suvedami į lentelę 2.25. Kad būtų galima palyginti šaldymo agento dozę su standartinė – serijine sistema, skaičiavimai pabaigti ir su R507A, o gauti rezultatai nominaliomis ir maksimaliomis sąlygomis taip pat surašyti į lentelę.

2.25 lentelė. Skaičiavimo rezultatų suvestinė

	R290 (propanas)		R1270 (propilenas)		R507A	
	$T_c = 27^\circ\text{C}$	$T_c = 55^\circ\text{C}$	$T_c = 27^\circ\text{C}$	$T_c = 55^\circ\text{C}$	$T_c = 27^\circ\text{C}$	$T_c = 55^\circ\text{C}$
<b>Garintuvas</b>	0,290 kg	0,291 kg	0,314 kg	0,287 kg	0,572 kg	1,417 kg
<b>Kondensatorius</b>	0,166 kg	0,176 kg	0,175 kg	0,188 kg	0,827 kg	0,937 kg
<b>Resiveris</b>	0,1 kg	0,11 kg	0,11 kg	0,118 kg	1,076 kg	1,32 kg
<b>Filtrai</b>	0,073 kg	0,066 kg	0,075 kg	0,067 kg	0,156 kg	0,128 kg
<b>Skysčio linija</b>	0,034 kg	0,030 kg	0,035 kg	0,031 kg	0,072 kg	0,059 kg
<b>Kiti elementai</b>	0,07 kg	0,07 kg	0,07 kg	0,07 kg	0,14 kg	0,14 kg
<b>Bendra dozė</b>	0,733 kg	0,743 kg	0,779 kg	0,761 kg	2,843 kg	4,001 kg

Apibendrinant gautus rezultatus, matyti, kad keičiant aplinkos temperatūrą nuo  $t_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$  iki  $38^{\circ}\text{C}$  (atitinkamai  $T_c = 27^{\circ}\text{C}$  ir  $55^{\circ}\text{C}$ ) sistemoje su propanu ir propilenu dozė kintai nežymiai. Kadangi šios sistemos veikia su EEV ir jose nėra OPR, virimo slėgį ir tuo pačiu temperatūrą apsprendžia MOP nustatymas (šiuo atveju 2 bar). Taigi, propanui, esant maksimalioms sąlygoms virimo temperatūra lygi  $-25^{\circ}\text{C}$ ; propilenui  $-31,5^{\circ}\text{C}$ . Palyginus su R507A sistema, matyti, kad kai aplinkos temperatūra  $t_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ , dozė sistemoje išauga 1,18 kg lyginant su doze prie nominalių sąlygų. Šiuo atveju išsiplėtimo vožtuvas riboja šaldymo agento padavimą į garintuvą. Kadangi nėra MOP ir virimo temperatūra nėra ribojama, šiuo atveju ji lygi  $+31^{\circ}\text{C}$  (žr. 1.3 pav.). Tokie dideli temperatūrų skirtumai lyginant su nominalių sąlygų temperatūromis paaiškina ir didelį dozės prieaugį.

Lentelės eilutėje „kiti elementai“ nurodytas šaldymo agento kiekis neskaičiuotuose komponentuose – akutėje, likusiame vamzdyne, kompresoriuje. Šiuo atveju priimama tiek propanui, tiek propilenui po 0,07 kg. Atitinkamai, R507A agentui 0,14 kg.

Bet kokiu atveju, lyginant bendras apskaičiuotas dozes sistemoje akivaizdu, kad tiek sistema su propanu (R290), tiek sistema su propilenu (R1270) numatomo 500g reikalavimo A3 šaldymo agentams netenkins ir tokiai sistemai reikalinga tolimesnė dozės optimizacija.

### 3. Eksperimentinė dalis

Bandymų metu panaudotas Iotech Personal Daq/56 duomenų surinkimo modulis. Duomenų surinkimo sparta nustatyta 610 ms., o skenavimo periodas atitinkamai 30s. Temperatūros matavimui naudotos K tipo termoporos (tikslumas  $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$ , įskaitant ir  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  šalto galo temperatūros kompensavimą). Slėgio matavimai atlikti pasitelkus Danfoss AKS 32 slėgio daviklius (tikslumas  $\pm 0,8\%$  maksimalus,  $\pm 3\%$  tipinis). Elektros energijos suvartojimas išmatuotas elektros energijos matuokliu ABB OD 4165 (impulsų dažnis 100 imp/kWh).

Pagrindiniai parametrai vertinant sistemos veikimą yra: aplinkos temperatūra, vidaus oro temperatūra, siurbimo temperatūra (garų temperatūra prieš kompresorių), kondensacijos slėgis, siurbimo slėgis ir energijos suvartojimas. Aplinkos temperatūra nusakoma 4 arba 5 skirtingų temperatūrų (šaldytuvo priekyje ir gale, 100 mm virš stogo ir žemiau dugno) vidurkiu. Vidaus oro temperatūra nusakoma 5 temperatūrų (100 mm žemiau eutektinių plokščių bei 100 mm virš grindų šaldytuvo priekiniame, galiniame ir centriniame skyriuose. Norint sumažinti spinduliavimo poveikį, visos temperatūros matuojamos aliuminiuose cilindruose. Siurbimo temperatūra matuojama siurbimo vamzdžio išorėje, 300 mm nuo kompresoriaus (termopora priklijuojama prie siurbimo vamzdžio 2 aliuminės lipnios juostos sluoksniais.

Kondensacijos bei siurbimo temperatūros apskaičiuojamos pagal atitinkamus slėgius (didžiausia paklaida kondensacijai yra 0,3 K, o virimui – 0,2 K). Taipogi išmatuota ir daugiau parametrų: eutektinių plokščių paviršiaus temperatūros, iš garintuvo išeinančio vamzdelio temperatūra, skysčio ir garo temperatūros prieš šilumokaitį ir skysčio temperatūra už šilumokaičio, oro temperatūra prieš ir už kondensatoriaus, kompresoriaus išmetamų garų temperatūra (300 mm už kompresoriaus). Skysčio būsena po filtro – sausintuvo sekama vizualiai, per akutę.

Įprastai norint palyginti kelių šaldytuvų veikimą rekomenduojama bandymus atlikti esant pastovioms sąlygoms. Deja, toks metodas eutektinėms šaldymo sistemoms nelabai tinka dėl vykstančių fazinių virsmų. Galimybė priversti eutektinę sistemą dirbti nuolatos, palaikant pastovią vidaus oro temperatūrą, yra, tačiau tada reikia papildomai naudoti kaitintuvus, o ir sąlygos tokiu atveju tampa tolimomis nominalioms ir negali būti naudojamas norint tiksliai nuspėti realų sistemos veikimą eksploatacijos metu.

Eutektinės sistemos veikimas vertinamas pereinamuoju laikotarpiu, o atšaldymo bandymas laikomas pagrindiniu. Šio bandymo pradžioje, šaldytuvo vidaus bei eutektinių plokščių paviršiaus temperatūra lygi aplinkos temperatūrai. Šaldytuvą įjungiamas ir dirba tol, kol pasiekama išjungimo temperatūra ( $36^{\circ}\text{C}$  orui). Kiekvienos darbo dienos pabaigoje transportinio šaldytuvo vidaus temperatūra apytikriai svyruoja nuo  $-18^{\circ}\text{C}$  iki  $-20^{\circ}\text{C}$ , o plokštėse esantis eutektinis skystis būna ištiręs. Todėl geriausiais kasdieninio veikimo rodiklis yra atšaldymo bandymo intervalas, kai vidaus temperatūra kinta nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$ .

Dar vienas svarbus bandymas nusako šaldytuvo gebėjimą išlaikyti temperatūrą. Po to, kai pasiekiamos stabilios on/off ciklavimo sąlygos, šaldymo sistema išjungiamas – vidaus temperatūra pradeda kilti. Laikas, per kurį temperatūra pakyla nuo  $-33^{\circ}\text{C}$  iki  $-20^{\circ}\text{C}$ , priklauso nuo eutektinėse plokštėse atšaldymo metu suakumuliuoto šalčio kiekio.

Išmatuotas temperatūrų skirtumas tarp aplinkos oro ir vidaus oro panaudojamas apskaičiuoti šilumos srautui  $q$ , ( $W$ ):

$$q = \Delta T / R_{sum} \quad (3.1)$$

Bendras šilumos perdavimas gaunamas integruojant šilumos perdavimo greitį ir laikomas lygiu eutektinėse plokštėse suakumuliuotam šalčiui. Bendra šaldytuvo varža  $R_{sum}$  nustatoma atskiru bandymu. Jo metu į šaldytuvo vidų įdedamas kaitintuvas ir nusistovėjęs temperatūrai, išmatuojama šildymo galia  $q_h$  ( $W$ ) ir temperatūrų skirtumas  $\Delta T$  ( $K$ ). Tada:

$$R_{sum} = \Delta T / q_h \quad (3.2)$$

Palyginimui naudojami parametrai: atšaldymo laikas, energijos suvartojimas ir naudingumo koeficientas COP (atitinkantis atšaldymą nuo  $-20^{\circ}C$  iki  $-33^{\circ}C$ ). Pirmieji du parametrai matuojami tiesiogiai. COP paprastai nusakomas kaip šaldymo našumo ir energijos suvartojimo santykis. Šaldymo našumas negali būti tiesiogiai išmatuotas, todėl yra skaičiuojamas kaip šilumos kiekio vykstant mainams atšaldymo metu ir suakumuliuoto šalčio suma:

$$Q = Q_{tr} + Q_{ac} \quad (3.3)$$

Abu šie parametrai apskaičiuojami integruojant atitinkamą šilumos perdavimą  $\Delta T(t) / R_{sum}$  per atšaldymo laiko intervalą.  $Q_{tr}$  apskaičiavimui  $\Delta T(t)$  reikšmė gaunama iš atšaldymo bandymo, o  $Q_{ac}$  – iš temperatūros išlaikymo bandymo.

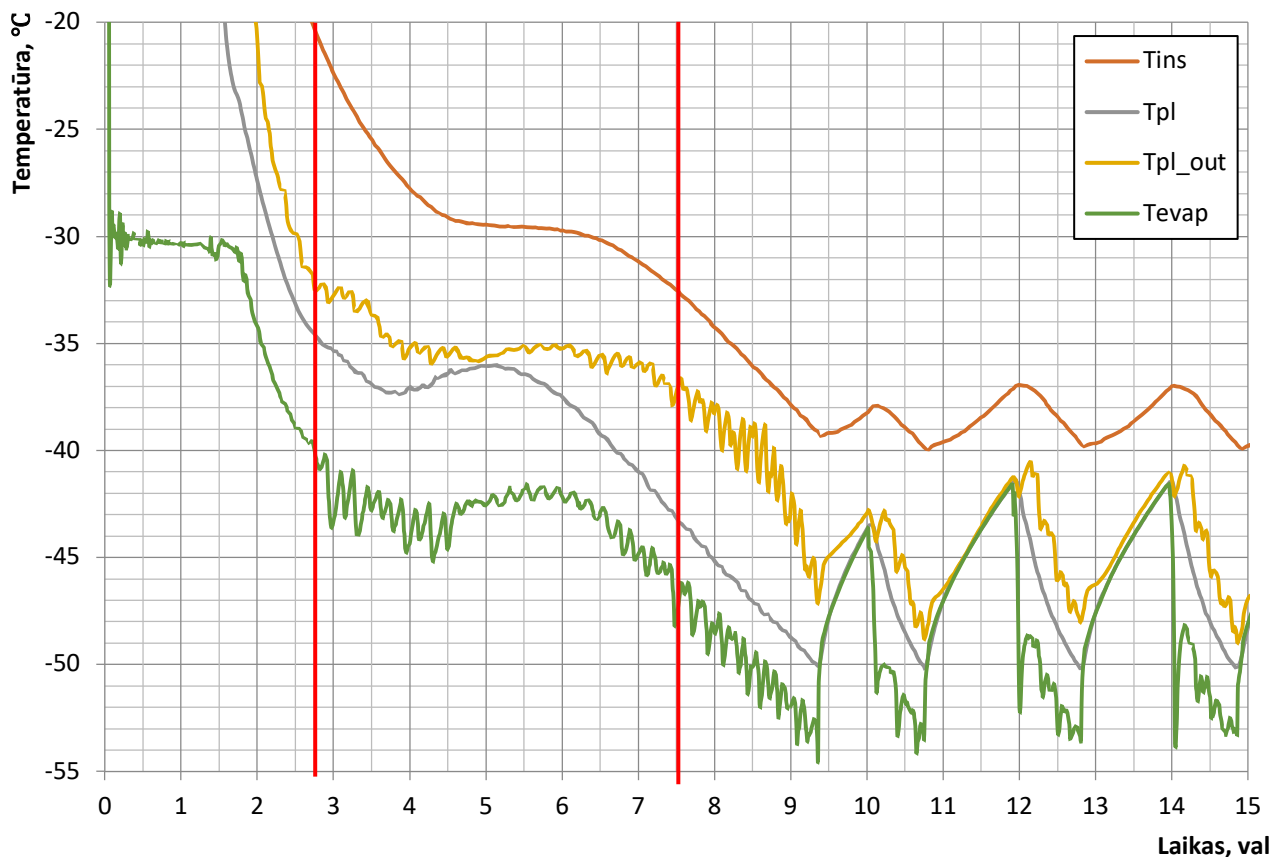
Toks metodas turi trūkumų. Pirmiausia, visi reikalingi bandymai atima daug laiko, kadangi reikalingi tiek atšaldymo, tiek temperatūros išlaikymo bandymai ir papildomas bandymas bendrai šaldytuvo varžai  $R_{sum}$  nustatyti. Gaunama COP vertė yra ne momentinė, tam tikro laiko periodo vidurkis. Bendra šiluminė varža  $R_{sum}$  nustatoma prie daug aukštesnių temperatūros nei darbinė, todėl būtina įvertinti ir izoliacijos laidumo pasikeitimus.

Visas atšaldymo metu suakumuliuojamas šaltis eutektinėse plokštėse priimamas kaip lygus bendram šilumos srautui, nustatytam temperatūros išlaikymo bandymo metu. Ši prielaida kai kuriomis sąlygomis gali būti ne visai tiksli, kadangi bandymo metu naudojamu eutektinių plokščių būseną gali skirtis, net jeigu ir temperatūrų intervalas yra toks pat. Prieš atliekant temperatūros išlaikymo bandymą eutektinės plokštės turi būti pilnai susikristalizavę, o on/off ciklavimas – stabilus. Verta paminėti, eutektinės plokštės gali ir nesusikristalizuoti, jeigu termostatinis išsiplėtimo vožtuvas nėra tinkamai sureguliuotas. Būtent dėl šių neaiškumų nustatinėjant COP, šis parametras nėra įtraukiamas į eutektinės sistemos technines specifikacijas.

Kita vertus, greitam COP nustatymui, kartu su kondensacijos, virimo ir siurbimo temperatūromis, gali būti panaudojami kompresoriaus gamintojo pateikiami duomenys (2 skyriuje panaudoti regresinės lygties koeficientai pagal atitinkamą standartą). Tokio metodo privalumai – nereikia atlikti temperatūros išlaikymo bandymo, o ir preliminari COP reikšmė gaunama iškart.

### 3.1. Šaldytuvo bandymai su propanu (R290)

Remiantis aprašyta bandymų eiga atliktas sistemos su propanu (R290) atšaldymo bandymas, kai vidaus temperatūra kinta nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$ . Šis temperatūrų skirtumas grafike (3.1 pav.) pažymėtas raudonomis vertikaliomis linijomis.



3.1 pav. Sistemos su R290 atšaldymas nuo  $-20^{\circ}\text{C}$

Šiame grafike  $T_{ins}$  – šaldytuvo vidaus temperatūra;  $T_{pl}$  – eutektinių plokščių temperatūra;  $T_{pl.out}$  – temperatūra eutektinių plokščių išėjime;  $T_{evap}$  – virimo temperatūra.

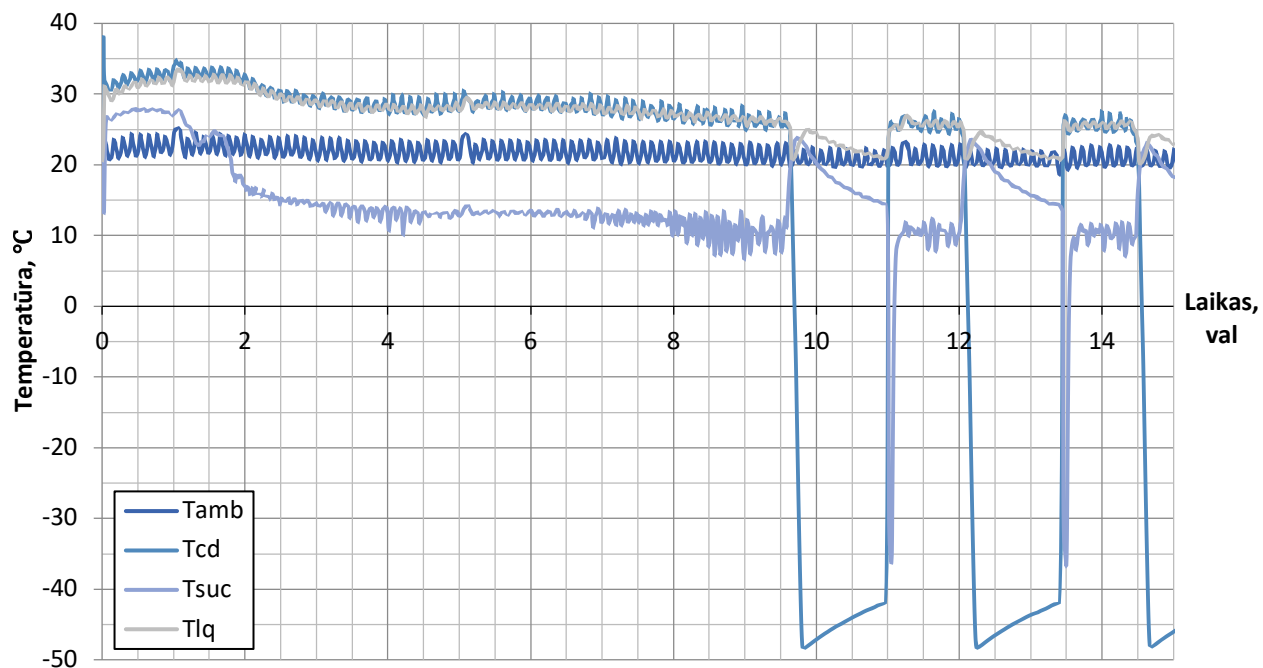
Šio bandymo metu aplinkos temperatūra buvo palaikoma  $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ . Kai vidaus temperatūra  $-20^{\circ}\text{C}$ , virimo temperatūra siekia  $-38^{\circ}\text{C}$ . Verta paminėti, kad vidaus oro temperatūros kitimas nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$  atitinka eutektinio skysčio plokštėse kristalizaciją. Dėl skysčio kristalizacijos metu išsiskiriančios šilumos pastebimas temperatūrų kritimo sulėtėjimas.

Matyti, kad sistema nuo  $-22^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$  atšaldoma per  $\pm 4,5$  val., o tai yra normalus atšaldymo laikas. Kai vidaus temperatūra lygi  $-33^{\circ}\text{C}$ , virimo temperatūra lygi  $-48^{\circ}\text{C}$ , o plokščių temperatūra pasiekia  $-43^{\circ}\text{C}$ . Atitinkamai, kai virimo temperatūra

Sekančiame grafike (3.2 pav.) pavaizduotos likusios bandymo temperatūros. Šiuo atveju  $T_{amb}$  – aplinkos oro temperatūra,  $T_{cd}$  – kondensacijos temperatūra,  $T_{lq}$  – skysčio temperatūra,  $T_{suc}$  – siurbiamų garų temperatūra.

Matyti, kad siurbiamų garų temperatūra nusistovi ties  $11 - 12^{\circ}\text{C}$ , o tai iš esmės atitinka siurbimo temperatūrą, apskaičiuotą 2 skyriuje.

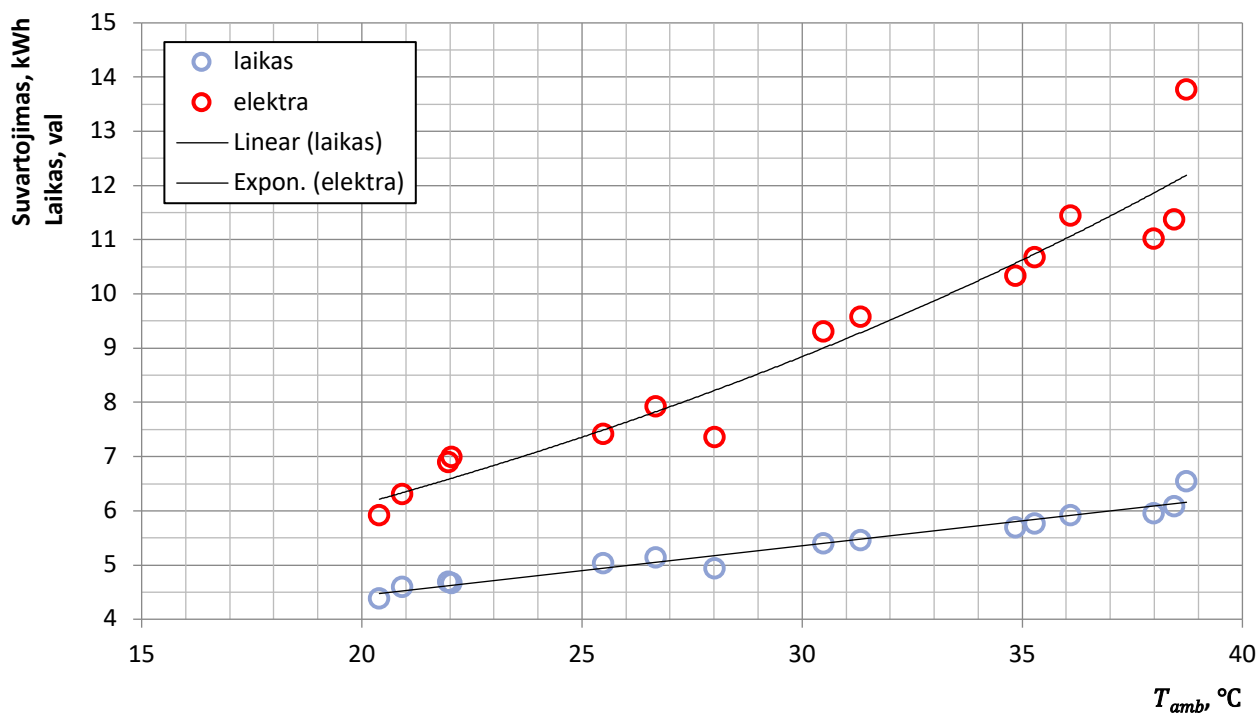




3.2 pav. Sistemos su R290 bandymų grafikas

Aplinkos temperatūra palaikoma  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ . Pagal rezultatų grafiką (3.2 pav.) matyti, kad tai atitinka  $27 - 28^{\circ}\text{C}$  kondensacijos bei skysčio temperatūrą. Šaldytuvas pilnai atšaldo per  $\sim 9,5$  val ir sistema pradeda cikluoti, kompresorius veikia "on-off" režimu. Kiekvienas atšaldymo ciklas trunka apie 1 val.

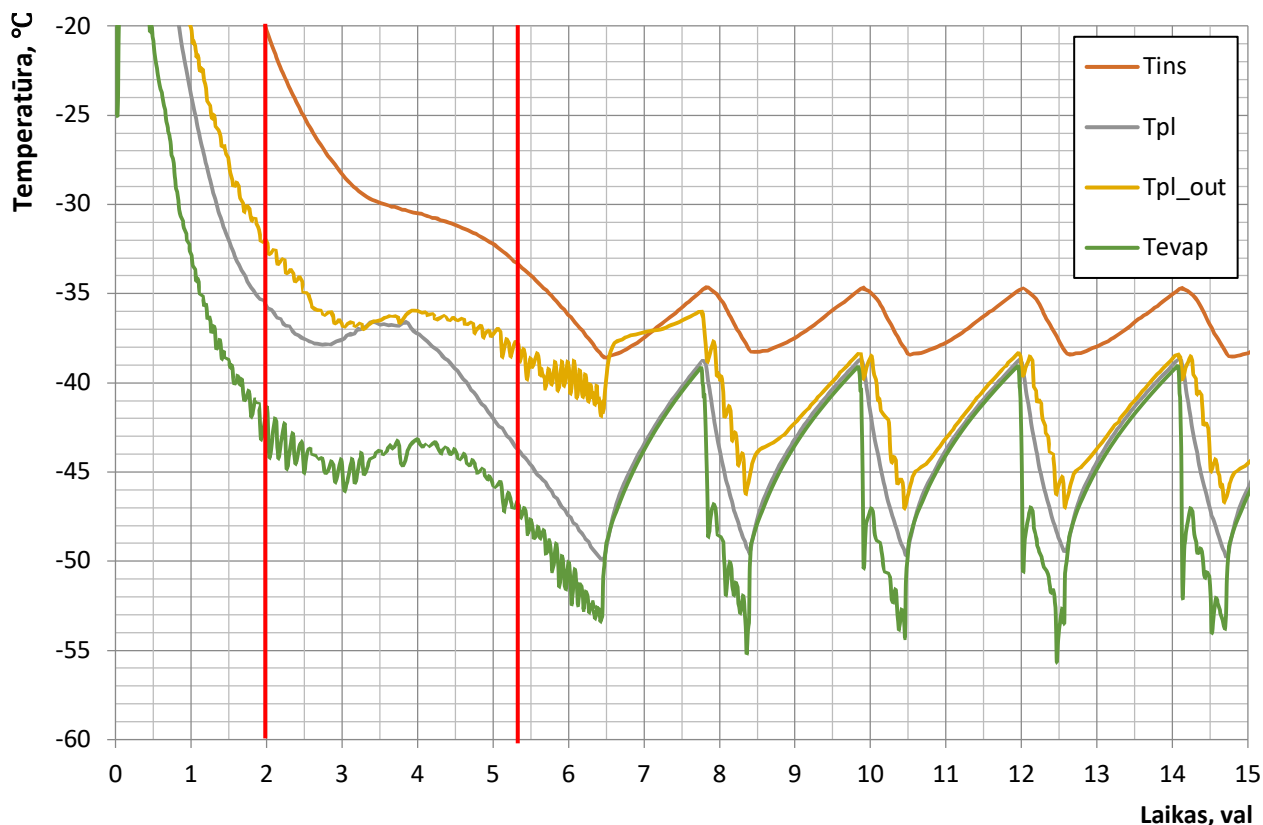
Suvartojamos elektros energijos ir atšaldymo laiko priklausomybė nuo skirtingų aplinkos temperatūrų pavaizduota grafiškai 3.3 pav.



3.3 pav. R290 sistemos atšaldymo laiko ir elektros energijos priklausomybė nuo aplinkos temperatūros

Grafike pažymėti išsibarstymo taškai atitinka kiekvienos atskiros dienos bandymo rezultatus. Tuo atveju, kai aplinkos temperatūra lygi 20°C, elektros suvartojimas siekia ~6 kWh. Kylant aplinkos temperatūrai, elektros energijos suvartojimas didėja eksponentiškai. Kai aplinkos temperatūra pasiekia 38°C, elektros energijos suvartojimas išauga iki ~11,5 kWh - 91% daugiau nei atšaldant esant nominaliai aplinkos temperatūrai. Atitinkamai kinta ir atšaldymo laikas – kaip jau minėta, kai  $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ , sistema nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $33^{\circ}\text{C}$  atšaldo per 4,5 val. Kai  $T_{amb} = 38^{\circ}\text{C}$ , atšaldymo laikas pailgėja iki 6 val.

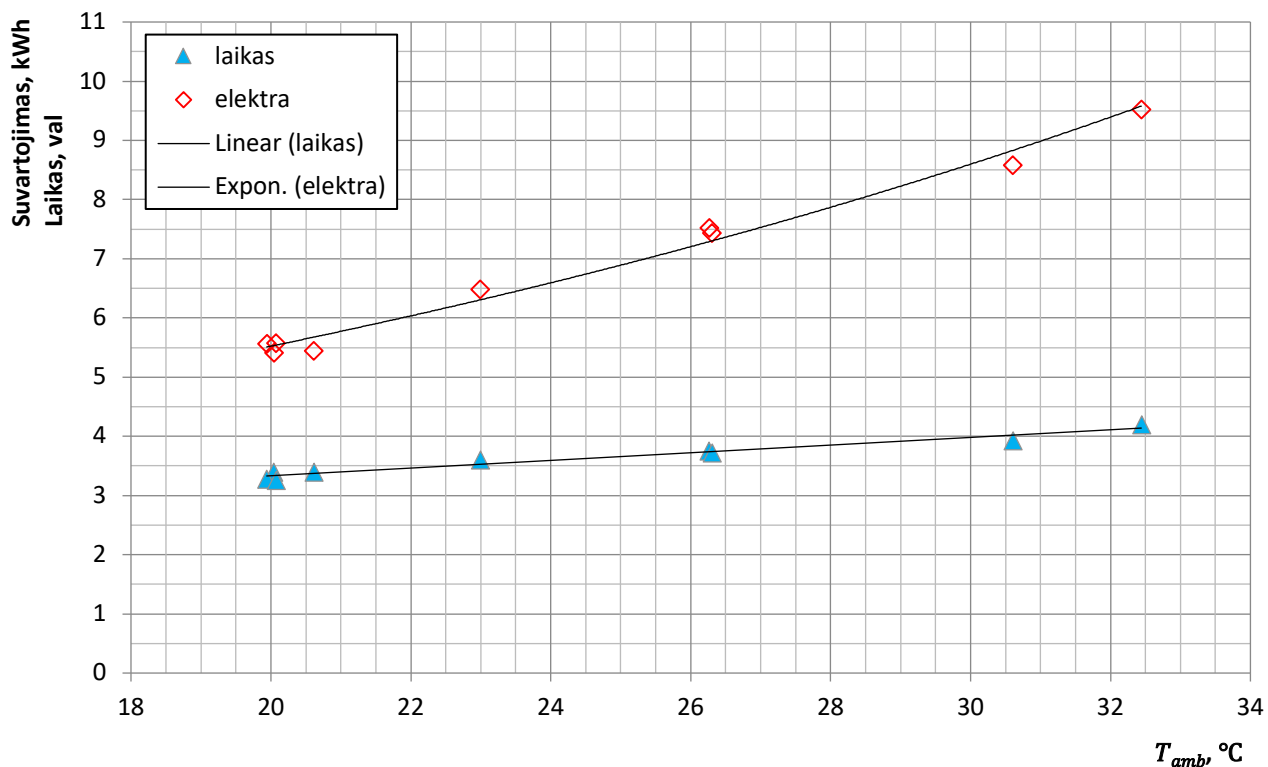
### 3.2. Šaldytuvo bandymai su propilenu (R1270)



3.4 pav. Sistemos su R1270 atšaldymas nuo  $-20^{\circ}\text{C}$

Sistemai su propilenu atlikti tokie patys bandymai kaip ir sistemai su propanu. Lyginant abiejų sistemų atšaldymo grafikus pastebimas propileninės sistemos greitesnis atšaldymas nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$ . Kai aplinkos temperatūra  $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ , sistema su propilenu atšaldo per 3,4 val. – 30% greičiau nei sistema su propanu. Kai vidaus temperatūra  $T_{ins} = -20^{\circ}\text{C}$ , virimo temperatūra lygi  $T_{evap} = -43^{\circ}\text{C}$ . Atitinkamai, kai vidaus temperatūra pasiekia  $-33^{\circ}\text{C}$ , virimo temperatūra  $T_{evap} = -48^{\circ}\text{C}$ . Abiejose sistemose eutektinės plokštės pilnai susikristalيزuoja – žemiausia plokščių temperatūra sistemoje su propilenu siekia  $-50^{\circ}\text{C}$  ir yra beveik identiška sistemai su propanu.

Analizuojant propilenu užpildytos sistemos atšaldymo laiko bei elektros energijos suvartojimo priklausomybės grafiką pastebima, kad kai aplinkos temperatūra yra  $20^{\circ}\text{C}$ , atšaldymo metu suvartotas elektros energijos kiekis lygus  $5,5\text{ kWh}$ . Šiuo atveju šis dydis beveik 10% mažesnis nei sistemoje su propanu.



**3.5 pav.** R1270 sistemos atšaldymo laiko ir elektros energijos priklausomybė nuo aplinkos temperatūros

Keičiant aplinkos temperatūrą, atšaldymo rezultatai panašūs: kai aplinkos temperatūra  $T_{amb} = 33^{\circ}\text{C}$ , elektros energijos suvartojimas lygus 9,5 kWh, o tai yra 5% mažiau, negu sistemoje su propanu. Prie šios temperatūros sistema su propilenu nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-30^{\circ}\text{C}$  atšaldymo per maždaug 4,1 val. Lyginant su propanu, tai yra 30% greitesnis atšaldymo laikas.

Apibendrinant rezultatus, matyti, kad sistema su propanu veikia patenkinamai – atšaldymo laikas kai aplinkos temperatūra  $20^{\circ}\text{C}$  normalus ir užtrunka 4,5 val., o tai iš esmės atitinka serijinės sistemos su R507A agentu darbą. Taip pat galima teigti, kad elektros energijos suvartojimas taip pat atitinka serijinės sistemos darbą.

Kita vertus, reikėtų atkreipti dėmesį ir į šaldymo sistemos užpildytos propilenu darbą – su šiuo šaldymo agentu pastebimi sistemos atšaldymo laiko bei elektros sąnaudų pagerėjimai. Tai būtų galima aiškinti propileno savybėmis – esant vienodam slėgiui, propileno virimo temperatūra yra žemesnė nei propano.

## Išvados

Atlikus šaldymo agentų analizę, nustatyta, kad propanas pasižymi VAP=20; ODP=0, nedideliu tankiu bei degumu. Dėl degumo R290 klasifikuojamas kaip A3 šaldymo agentas ir jam galioja griežti leidžiamos dozės apribojimai.

Dozės skaičiavimui sudarytas matematinis modelis dvifaziam srautui, panaudojama Premoli koreliacija slydimo santykiui, kuri yra labiausiai tinkama analizuojamai šaldymo sistemai.

Skaičiavimai atlikti garintuvui, kondensatoriui, resiveriui, filtrui, skysčio linijai tiek nominalioms, tiek maksimalioms sąlygoms. Rezultatai parodė, kad bet kokių atveju dozė sistemoje bus didesnė nei reikalavimuose numatomi 500g – propanui maksimali apskaičiuota dozė sistemoje lygi 743g, propilenui – 779g. Daroma išvada, kad tiriamai sistemai reikalinga tolimesnė dozės optimizacija.

Eksperimentinėje dalyje išbandytos propano ir propileno sistemos. Vidaus temperatūros kitimo intervale nuo  $-20^{\circ}\text{C}$  iki  $-33^{\circ}\text{C}$  (aplinkos temperatūra  $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ), sistema užpildyta propanu atšaldė per 4,5 val. ir tam sunaudojo 6 kWh. Galima daryti išvadą, kad sistemos darbas tenkina ir atitinka serijinės sistemos su R507A agentu darbą.

Kita vertus, bandymai su propilenu parodė, kad tame pačiame intervale ir esant toms pačioms sąlygoms, atšaldymo laikas lyginant su propanu sumažėja beveik 30%, o elektros energijos suvartojimas – 10%, todėl atliekant tolimesnius tyrimus tai reikėtų įvertinti.

## Literatūros sąrašas

1. DEVOTTA S. "Performance assesment of HC-290 as a drop in substitute to HCFC-22 in a window air conditioner, International journal of refrigeration,2005;28:594-604
2. Y.S. CHANG et. al., "Performance and heat transfer charactristics of hydrocarbon refrigerants in a heat pump system", Interantional Journal of refrigeration 23(2000) 232-242
3. BITZER: „Refrigerant Report 20“ 2018
4. Reference fluid thermodynamic and transport properties REFPROP Version 9.0", NIST Standard Reference Database 23, NOV 2010.
5. New Refrigerants Designation and Safety Classifications [žiūrėta 2019-05-20] Prieiga internete: <https://climate.emerson.com/documents/presentations-chicago---new-refrigerants-designation-safety-classifications-en-us-3663334.pdf>
6. DING, G.; MA, X.; ZHANG, P.; HAN, W.; KASAHARA, S.; YAMAGUCHI, T. 2009. Practical methods for measuring refrigerant mass distribution inside refrigeration system, International Journal of Refrigeration 32: 327-334.
7. BJÖRK, E. 2005. A simple technique for refrigerant mass measurement, Applied Thermal Engineering 25: 1115-1125
8. PRIMAL, F.; PALM, B. 2004. Propane heat pump with low refrigerant charge: design and laboratory tests, International Journal of Refrigeration 27: 761-773.
9. CAVALLINI, A.; DA RIVA, E.; DEL COL, D. 2010. Per- formance of a large capacity propane heat pump with low charge heat exchangers, International Journal of Refrigeration 33: 242-250.
10. HRNJAK, P.; LITCH, A.D. 2008. Microchannel heat exchangers for charge minimization in air-cooled ammonia condensers and chillers, International Journal of Refrigeration 31: 658-668.
11. TASSOU S.A.; GRACE, I.N. 2005. Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigeration system, International Journal of Refrigeration 28: 680-688.
12. CHOI, J.; KIM, Y. 2002. The effects of improper refri- gerant charge on the performance of a heat pump with an electronic expansion valve and capillary tube, Energy 27: 391-404.
13. JENSEN, J.B.; SKOGESTAD, S. 2007. Optimal operation of simple refrigeration cycles Part I: Degrees of free- dom and optimality of sub-cooling, Computers and Chemical Engineering 31: 712-721.
14. ŠINKŪNAS, S.; KIELA, A. 2011. Heat transfer for film condensation of vapour, Mechanika 17(2): 144-148.
15. SAFFARI, H.; DLIR, N. 2011. Effect of friction stress of droplets with film on prediction of pressure changes in condensing tubes, Mechanika 17(1): 50-56.
16. FARZAD, M.; O'NEAL, D. 1994. The effect of void frac- tion model on estimation of air conditioner system per- formance variables under a range of refrigerant charg- ing conditions, Revue Internationale du Froid 17(2): 85-93.
17. VAITKUS, L. 2012. Low charge transport refrigerator (II). Theoretical and experimental investigation, Mechanika 18(1): 99-107.
18. VAITKUS, L., DAGILIS, V., 2014, Refrigerant charge reduction in low-temperature transport refrigerator with the eutectic plate evaporator, International Journal of Refrigeration, 47, 46-57
19. AUTE, VIKRANT AND MARTIN, CARA, "A Comprehensive Evaluation of Regression Uncertainty and the Effect of Sample Size on the AHRI-540 Method of Compressor Performance Representation" (2016). International Compressor Engineering Conference. Paper 2457. <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2457>