



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas

Baigiamojo magistro projektas

Arminas Kalvelis
Projekto autorius

Doc. dr. Egidijus Puida
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas

Baigiamojo magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 6211EX023)

Arminas Kalvelis
Projekto autorius

Doc. dr. Egidijus Puida
Vadovas

Doc. dr. Liutauras Vaitkus
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Arminas Kalvelis

Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Armino Kalvelio*, baigiamasis projektas tema „*Šilumos siurblio efektyvumo 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 (kodas 6211EX023)

Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas

Studentui – Arminas Kalvelis

1. Baigiamojo projekto tema –

Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas

(Lietuvių kalba)

Heat pump efficiency research

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas – ištirti alternatyvią šilumos siurblio sistemą, skirtą namo šildymui ir karšto vandens ruošimui. Ją suprojektuoti, įrengti, stebėti darbą ir pateikti rezultatus.

Uždaviniai - atlikti šilumos siurblių palyginamąją analizę; apžvelgti tiesioginį išgarinimą naudojančias sistemas; suprojektuoti ir įrengti eksperimentinę šilumos siurblio sistemą, stebėti jos darbą žiemos metu; išanalizuoti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Name įrengta oras – vanduo šilumos siurblio sistema; Šilumos siurblio, kuriame integruojamas naujas garintuvas, šildymo galia yra 7 kW; Šilumos siurblys ruošia ir karštą vandenį; Sistema naudoja R407C šaldymo agentą.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Laikytis Lietuvos Respublikos įstatymų, norminių aktų, taisyklių, Europoje taikomų standartų bei baigiamojo magistro darbo apiforminimo reikalavimų.

Projekto autorius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Arminas, Kalvelis. Šilumos siurblio efektyvumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Egidijus Puida; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų kryptių grupė), studijų kryptis: Termoinžinerija, Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: šilumos siurblys, šaldymo agentas, efektyvumas, garintuvas.

Kaunas, 2019. 61 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte tiriama šilumos siurblio sistema su tiesioginio išgarinimo šilumokaičiu, esančiu vandens talpoje. Projekto tikslas ištirti ar tokia sistema gali dirbti efektyviau šaltomis žiemos dienomis, nei standartinis oras – vanduo ir gruntas - vanduo šilumos siurbliai. Eksperimentinė sistema suprojektuojama, tada sumontuota ir žiemos metu rinkta informacija apie jos darbą. Apžvelgiami rezultatai, palyginama su standartinių šilumos siurblių darbo sąnaudomis. Atliekama aeroterminio ir geoterminio šilumos siurblių palyginamoji analizė. Darbe atlikta literatūros analizė apie tiesioginio išgarinimo sistemas, aprašyti aspektai nuo kurių priklauso sistemų efektyvumas ir jų tobulinimo kryptys. Pagal gautus rezultatus nustatyta, kad sistema dirba neefektyviai, reikalingi patobulinimai. Pasiūlytas sistemos tobulinimo variantas.

Arminas, Kalvelis. Heat pump efficiency research. Master's Final Project / supervisor Egidijus Puida; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Thermoengineering, Energy engineering

Key words: heat pump, refrigerant, efficiency, evaporator.

Kaunas, 2019. 61 p.

Summary

In this final masters thesis, a research on experimental direct exchange system with evaporator placed in water tank is performed. The goal of this project is to research if this new system model could work with better efficiency than standart air to water or ground to water heat pumps in cold winter days. Experimental system is desingned, installed and information about this system efficiency is gathered during winter. Results are analyzed and compared to regular heat pumps working costs. A comparison analysis on aerothermal and geothermal heat pumps is performed. In this project analysis of literature is performed on direct exchange systems, aspects of efficiency and directions for improvement is described. The results show that the system is ineffective and requires improvements. Suggested improvement option.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	10
Paveikslų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Šilumos siurblių palyginamoji analizė.....	13
1.1. Bendrai apie šilumos siurblius.....	13
1.1.1. Gruntas – vanduo šilumos siurbLIAI	14
1.1.2. Oras – vanduo šilumos siurbLIAI	14
1.1.3. Absorbciniai šilumos siurbLIAI	15
1.2. Aeroterminio ir geoterminio šilumos siurblių palyginimas.....	16
1.2.1. Efektyvumo palyginimas.....	16
1.2.2. Šilumos siurblių įsirengimo kainų palyginimas	19
1.2.3. Eksploatacinių išlaidų palyginimas	19
2. Darbo agentų naudojamų šilumos siurbliuose analizė.....	21
2.1. Darbo agentas	21
2.2. Šaldymo agentų klasifikavimas.....	21
2.3. Darbo agentų pavadinimų dekodavimas	22
2.4. Šaldymo agentų pageidautinos termodinaminės savybės.....	26
2.4.1. Virimo taškas.....	26
2.4.2. Užšalimo taškas	27
2.4.3. Garavimo ir kondensavimosi slėgiai	27
2.4.4. Kritinės temperatūros ir slėgiai	27
2.4.5. Agento latentinė šiluma	27
2.5. Šaldymo agentų analizė.....	27
2.5.1. R407C agento savybės	27
2.5.2. R410A agento savybės	28
2.5.3. R22 agento savybės	29
2.5.4. R134a agento savybės	30
3. Šilumos siurblių darbinio ciklo analizė	32
4. Tiesioginio išgarinimo sistemos	33
4.1. Garavimas.....	33
4.2. Tiesioginis išgarinimas.....	33
4.3. Žinomos problemos su tiesioginio išgarinimo kolektoriumi.....	35
4.4. Tiesioginį išgarinimą naudojančios sistemos ir jų analizė	36
5. Šilumos siurblys su dviem garintuvais	41
5.1. Tyrimo objektas.....	41
5.2. Garintuvo parinkimas	41
5.3. Garintuvo sistema.....	41
5.4. Termodinaminiai skaičiavimai	44
5.5. Tyrimo rezultatai	45
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50
Priedai.....	52
1 priedas. Geoterminio šilumos siurblio šildymo ir karšto vandens ruošimo ciklai su R407C darbo agentu.	52

2	priedas. Aeoterminio šilumos siurblio šildymo ir karšto vandens ruošimo ciklai su R407C darbo agentu.	53
3	priedas. Pirmojo garintuvo galios skaičiavimas „Coolpack“ programoje.....	54
4	priedas. Pirmojo garintuvo skaičiavimas „Solkane“ programoje.....	54
5	priedas. Eksperimentinio šilumos siurblio schema	55
6	priedas. Eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio.....	56
7	priedas. Eksperimento rezultatų lentelės.	57
8	priedas. Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema.....	59
9	priedas. Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio	60
10	priedas. Antrojo garintuvo skaičiavimas „Solkane“ programoje.	61

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Vidutinės mėnesio oro ir grunto temperatūros [3]	16
1.2 lentelė. Ciklo efektyvumą šildymo sezono metu palyginimas.....	17
1.3 lentelė. Ciklo efektyvumą palyginimas ruošiant karštą vandenį	17
1.4 lentelė. Šilumos siurblių įsirengimo kainos	19
1.5 lentelė. Šilumos siurblių vidutinės darbo valandos paros bėgyje	19
1.6 lentelė. Šilumos siurblių mėnesinės elektros suvartojimo prognozės	20
1.7 lentelė. Šilumos siurblių mėnesinės eksploataavimo išlaidos.....	20
1.8 lentelė. Geoterminio ir aeroterminio šilumos siurblių palyginimas.....	20
2.1 lentelė. Šaldymo agentų klasifikavimas pagal cheminę sudėtį	22
2.2 lentelė. Skaičių agentų pavadinime reikšmės.....	23
2.3 lentelė. Senujų šaldymo agentų pakeitimo alternatyvos	24
2.4 lentelė. Šaldymo agentų klasifikavimas pagal GWP	25
2.5 lentelė. Šaldymo agentų virimo temperatūros [8]	26
2.6 lentelė. Šaldymo agentų užšalimo temperatūros [8]	27
2.7 lentelė. R407C šaldymo agento fizikinės savybės [10]	28
2.8 lentelė. R410A šaldymo agento fizikinės savybės [12]	29
2.9 lentelė. R22 šaldymo agento fizikinės savybės [14]	30
2.10 lentelė. R134a šaldymo agento fizikinės savybės [16]	31
4.1 lentelė. Šaldymo agentų savitoji garavimo šiluma [10][12][14][16]	33
5.1 lentelė. Garintuvo skaičiavimo rezultatai.....	41
5.2 lentelė. Aqua Nova NCM-10000 siurblio techniniai parametrai [21].....	42
5.3 lentelė. Eksperimentinio šilumos siurblio techniniai parametrai	42
5.4 lentelė: Eksperimentinės sistemos mėnesinės šildymo išlaidos, Eur.....	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav.	Šilumos siurblio veikimo principas [1]	13
1.2 pav.	Geoterminio šilumos siurblio schema	14
1.3 pav.	Aeroterminio šilumos siurblio schema.....	15
1.4 pav.	Ciklo efektyvumo šildymo sezono metu palyginimas.	18
1.5 pav.	Ciklo efektyvumo palyginimas ruošiant karštą vandenį.	18
2.1 pav.	Šaldymo agentų alternatyvos.....	25
2.2 pav.	Populiariausių šaldymo agentų temperatūros priklausomybė nuo slėgio [7].....	26
3.1 pav.	R407C šaldymo agento darbinis ciklas	32
4.1 pav.	Vandens šildymo savybės	33
4.2 pav.	Geoterminio šilumos siurblio su tiesioginiu išgarinimu schema.....	34
4.3 pav.	Tiesioginio išgarinimo grunto kolektorius [17].....	34
4.4 pav.	Naujas ir sukorodavęs "Aukojamieji anodai" [19].....	35
4.5 pav.	Fazių kaita garintuve	37
4.6 pav.	Temperatūros kitimas garintuvo taškuose laiko atžvilgiu	37
4.7 pav.	Slėgio kitimas garintuvo išėjime	38
4.8 pav.	Šilumos srauto kitimas garintuve su skirtingais masiniais debitais	39
4.9 pav.	Šilumos srauto kitimas su skirtingais garintuvų ilgiais	39
4.10 pav.	Šilumos srauto kitimas garintuve su skirtingais orientavimais grunte	40
5.2 pav.	Garintuvo spiralės.....	43
5.3 pav.	Talpos montavimo darbai.....	43
5.4 pav.	Lapkričio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai.....	45
5.5 pav.	Gruodžio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai	46
5.6 pav.	Sausio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai.....	46
5.7 pav.	Vasario mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai.....	46

Ivadas

Pasaulyje senkant ir brangstant iškastinio kuro (nafta, anglys, gamtinės dujos) atsargoms, bei stiprėjant „šiltnamio efektui“, energetikoje ieškoma alternatyvių energijos šaltinių. Pastaraisiais metais sparčiai populiarėja atsinaujinantys energijos šaltiniai. Taip yra todėl, kad šių įrenginių energija yra neišsenkanti ir dauguma jų draugiški aplinkai, tai reiškia, kad nesusidaro jokių kenksmingų atliekinių medžiagų.

Šildymui populiariausi atsinaujinančios energetikos įrenginiai yra šilumos siurbliai. Europoje šiuo metu patys populiariausi yra oras – vanduo tipo. Jie puikiai tinka vakarų Europoje, kur net ir žiemos metu temperatūra ne taip ir dažnai nukrenta žemiau nulio. Tačiau šie šilumos siurbliai populiarūs ne tik vakarų Europoje. Rytinėje ir šiaurinėje senojo žemyno dalyje jie taip pat užėmė didžiąją dalį rinkos, nors ir pas mus žiemos daug šaltesnės. Taip yra dėl jų žemesnės kainos. Ekologiškiausia alternatyva šiam šildymo tipui yra geoterminiai šilumos siurbliai, tačiau jų įsirengimo kaina iki 30 % didesnė dėl reikalingų grunto darbų. Aeroterminių šilumos siurblių efektyvumas lauko temperatūrai artėjant link 0 °C ir peržengus šią ribą sparčiai krenta ir esant ypatingai šaltoms dienoms COP gali artėti prie 1. Tai reiškia, kad tuo metu šilumos siurblys praktiškai pamina tiek pat šilumos, kiek suvartoja elektros energijos. Taip pat dirbant tokiomis sąlygomis trumpėja pačio šilumos siurblio tarnavimo laikas. Dėl šios priežasties šiuo metu visuose oras-vanduo šilumos siurblių sistemose yra integruoti elektriniai tenai, kurie sutrumpina šilumos siurblio darbo laiką padėdami jam šildyti.

Oras – vanduo, kaip ir kitų kompresorinių šildymo/šaldymo sistemų kuras yra elektra. Kadangi elektros kaina vis kyla, ši energija vis dar daugiausiai gaunama ne iš atsinaujinančių energijos šaltinių, o šių įrenginių sezoninis efektyvumo koeficientas SCOP nėra labai aukštas, aktualu ieškoti būdų kaip išgauti didesnę efektyvumą šaltomis rytų ir šiaurės Europos žiemomis.

Darbo tikslas: Ištirti alternatyvią šilumos siurblio sistemą, skirtą namo šildymui ir karšto vandens ruošimui. Ją suprojektuoti, įrengti, stebėti darbą ir pateikti rezultatus.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti šilumos siurblių palyginamąją analizę;
2. Apžvelgti tiesioginį išgarinimą naudojančias sistemas;
3. Suprojektuoti ir įrengti eksperimentinę šilumos siurblio sistemą, stebėti jos darbą žiemos metu;
4. Išanalizuoti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

1. Šilumos siurblių palyginamoji analizė

1.1. Bendrai apie šilumos siurblius

Šilumos siurblys yra prietaisas, skirtas pastato šildymui. Šiuo metu tai vienas iš ekologiškiausių šildymo būdų, kadangi jis neturi jokių emisijų, o įrenginyje naudojami cheminiai elementai yra nekenksmingi aplinkai. Vienintelis aspektas, dėl kurio negalima įrenginio vadinti visiškai ekologišku yra tas, kad jam veikti reikalinga elektros energija, kuri dažniausiai imama iš tinklo ir dažniausiai yra gaminama iš iškastinio kuro.

Šilumos siurblys naudoja aplinkos šiluminę energiją ir elektros energiją. Šiluminės energijos jis pagamina 3 - 4 kartus daugiau negu suvartoja elektros energijos. Beveik visų šilumos siurblių, naudojamų gyvenamųjų namų ar komercinės paskirties patalpų šildymui veikimo principas yra toks pat. Skiriasi tik pirminės energijos šaltinis. Namų ūkyje dažniausiai yra naudojami vanduo – vanduo, gruntas – vanduo, oras – vanduo arba oras – oras šilumos siurbliai. Pramonėje dar naudojami absorbciniai šilumos siurbliai.

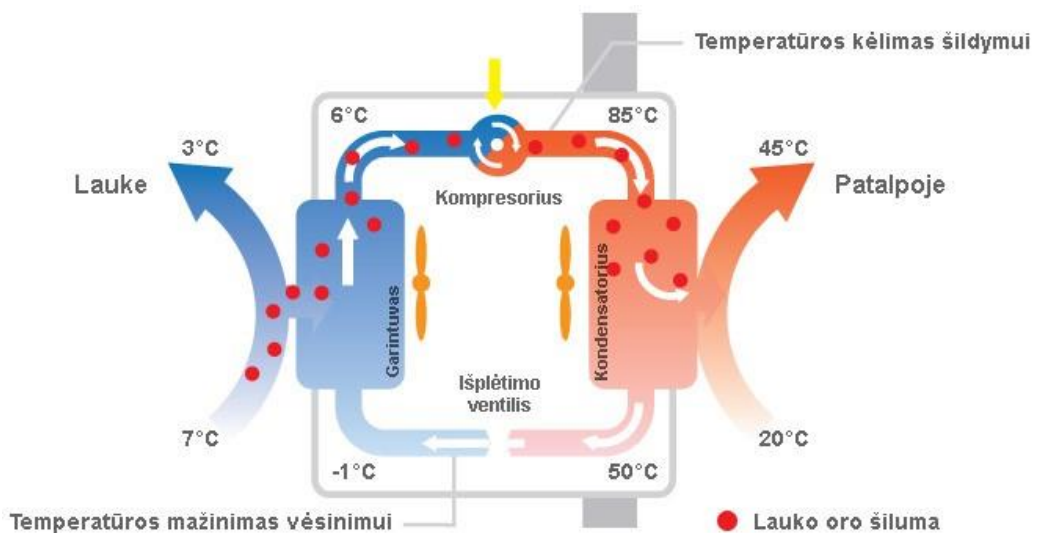
Šilumos paėmimas iš aplinkos dar kitaip vadinamas išgarinimu. Taip yra todėl, kad šaldymo agentas tekėdamas per garintuvą virsta garais ir garuodamas priima šilumą. Yra du išgarinimo metodai: tiesioginis ir netiesioginis. Pirmuoju atveju pats šaldymo agentas teka iki šilumos šaltinio, kur tiesiogiai priima šilumą, antruoju atveju yra papildomas skystis, dažniausiai vadinamas šilumnešiu, kuris pratekęs pro gruntą, vandenį ar orą, parneša šilumą iki garintuvo, kuriame ji perduodama šaldymo agentui.

Skirtumas tarp oras – vanduo ir gruntas – vanduo yra tas, kad pirmuoju atveju šiluma imama tiesiogiai iš oro garintuve, o antru atveju šiluma imama iš grunto kolektoriaus.

Pagrindinis rodiklis, nurodantis šilumos siurblio efektyvumą yra naudingumo koeficientas COP (*angl. Coefficient Of Performance*). Jis skaičiuojamas (1) formule:

$$COP_H = \frac{Q_k}{N} \quad (1)$$

čia COP_H – šildymo efektyvumas; Q_k – kondensatoriaus galingumas, kW; N – kompresoriaus naudojama galia.

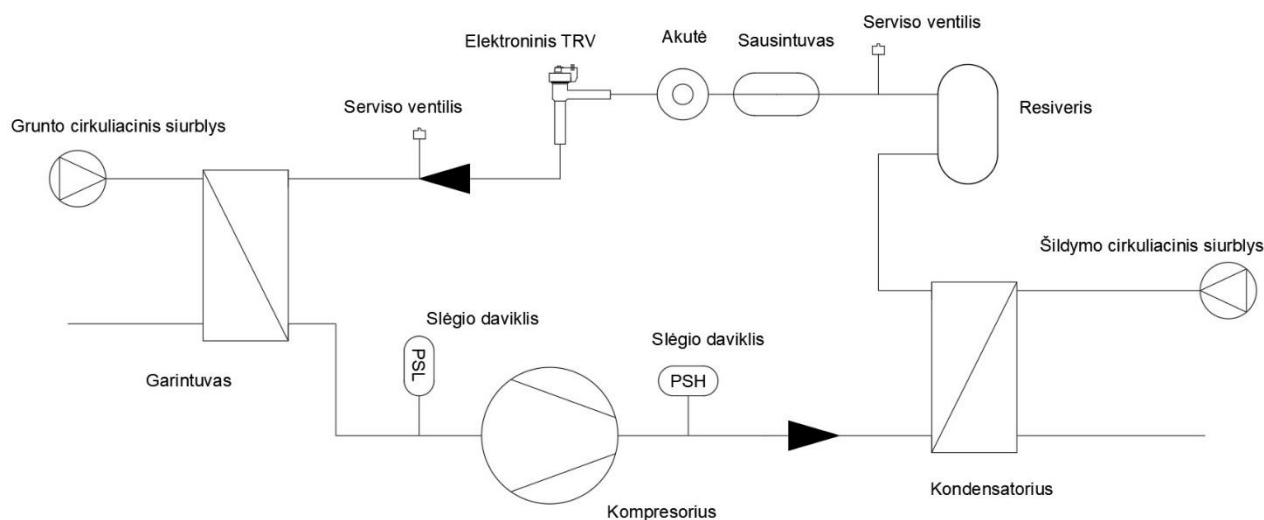


1.1 pav. Šilumos siurblio veikimo principas [1]

1.1.1. Gruntas – vanduo šilumos siurbliai

Šio tipo šilumos siurblys naudoja iš grunto arba netoliese esančio vandens telkinio gaunamą šilumos energiją. Tam reikalingi gręžiniai arba horizontalūs kolektoriai. Žemiau įšalo ribos (Lietuvoje 0,86 m) grunto temperatūra yra gana pastovi visais metų laikais ir žiemos metu gali siekti 7 - 8 laipsnius. To pilnai pakanka šilumos siurbliui veikti efektyviai. Tokio šilumos siurblio įrengimo kaina yra žymiai didesnė negu kitų šildymo sistemų, nes reikalingi gręžimo arba kasimo darbai. Horizontaliam kolektoriui reikalingas didelis žemės plotas, o gręžiniui reikalingas geras gruntas ir privažiavimas sunkiajai technikai. Todėl reikia įvertinti galimybes įsirengti tokį šildymo būdą. Tačiau statantis namą, aukštą įsirengimo kainą atperka tai, kad namui nereikia kamino, katilinė gali būti mažesnė, taigi sutaupoma lėšų. Be to namas šildomas tik mygtuko paspaudimu, nereikia jokio fizinio darbo, kaip kuro pakrovimo ir sandėliavimo.

Grunto kontūro cirkuliacinis siurblys stumia šilumnešį, kuris dažniausiai būna 30 % etilenglikolio ir 70 % vandens mišinys, per grunto kolektorių, iš kurio paimta šiluminė energija keliauja į garintuvą ir yra perduodama įrenginio šaldymo agentui, kuris dažniausiai būna R410A arba R407C. Pastarasis garintuve virsta garais ir keliauja į kompresorių, kuriame šie garai suslėgiami. Dėl suslėgimo stipriai padidėja temperatūra ir sušilę garai keliauja į kondensatorių, kur šiluma atiduodama šildymo sistemai ir garai susikondensuoja. Droseliavimo įrenginyje sumažinamas slėgis ir ciklas kartojasi (žr. 1.2 pav.).



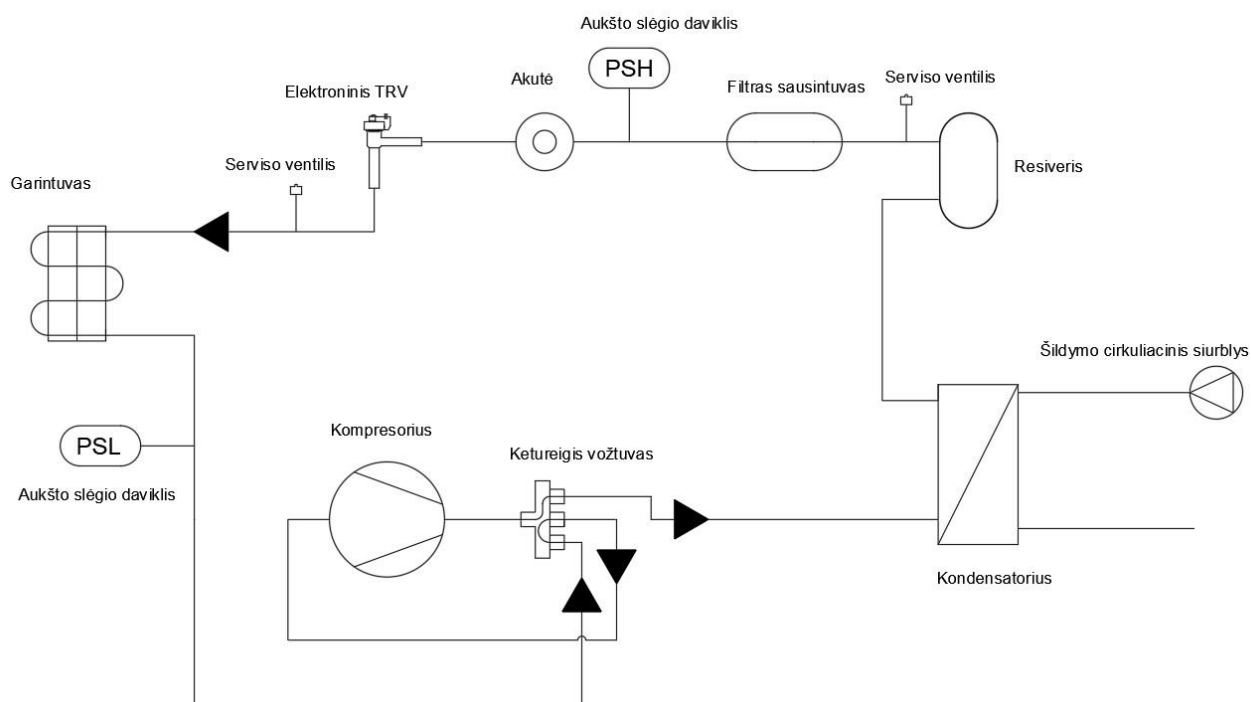
1.2 pav. Geoterminio šilumos siurblio schema

1.1.2. Oras – vanduo šilumos siurbliai

Tokio tipo šilumos siurblius sudaro dvi dalys: išorinis įrenginys ir vidaus įrenginys. Veikimo principas toks pat kaip ir gruntinio siurblio, tik aplinkos energija gaunama ne iš grunto, bet tiesiog iš oro. Išoriniame įrenginyje sumontuotas didelio ploto garintuvas, kuriame lauko oro šiluma perduodama tiesiogiai šaldymo agentui. Vidiniame įrenginyje kompresoriaus suslėgti garai atiduoda šilumą šildymo sistemai, arba oras – oras siurblio atveju – pučiamas šiltas oras į patalpą. Kaip ir su gruntiniu siurbliu, statant namą nereikia kamino ar didelės katilinės, be to namas šildomas vieno mygtuko paspaudimu. Tokio šilumos siurblio įsirengimo kaina mažesnė negu gruntinio, tačiau eksploatacinės išlaidos didesnės, nes žiemą atšalus orams įrenginio efektyvumas ženkliai krenta. Pavyzdžiui rudens metu ir esant 8 laipsnių lauko temperatūrai, šilumos siurblys 35 °C vandenį

paruošia su 4,22 COP, o kai lauko temperatūra siekia $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, jau įrenginio COP nukrenta iki 2,72. Esant dideliems šalčiams šis rodiklis gali būti artimas vienetui.

Taip pat aeroterminio šilumos siurblio lauko blokas dirbdamas pučia šaltą orą, bei skleidžia apie 39 - 45 dB garsą. Tai gali pakenkti tiek gyventojų tiek kaimynų komfortui.



1.3 pav. Aeroterminio šilumos siurblio schema

1.1.3. Absorbciniai šilumos siurbliai

Absorbcinio tipo šilumos siurbliai gaminami tik didelio galingumo ir naudojami pramonėje. Veikimo principas iš dalies panašus į gruntinio ar aeroterminio šilumos siurblio, tačiau čia vietoje elektros energijos naudojami kiti šilumos šaltiniai kaip kieto kuro katilinės, gamtinės dujos, saulės pašildytas vanduo ar geoterminiai vandenys.

19-tame amžiuje kaip darbiniai agentai šiuose įrenginiuose buvo naudojami amoniakas ir vanduo. Šiandien dažniausiai naudojami ličio bromidas ir vanduo. Vienoje sistemos pusėje vamzdynas kaitinamas ir vyksta garavimo procesas, o kitame gale susidaro pakankamai šalčio ledo susidarymui.

Efektyviam absorbcinio šilumos siurblio veikimui reikalinga bent jau $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ vandens temperatūra. Nors standartiniai saulės kolektoriai sugeba paruošti vandenį tik iki $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, jau yra ir suprojektuotų specialių kolektorių, kurie gali vandenį pašildyti net iki $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

1.2. Aeroterminio ir geoterminio šilumos siurblių palyginimas

1.2.1. Efektyvumo palyginimas

Buitinės paskirties šilumos siurbliai karštą vandenį ruošia ištisus metus, o šildo namus, žinoma, tik šildymo sezono metu, kuris prasideda spalio mėnesį ir baigiasi balandžio mėnesį. Analizuojant šilumos siurblių efektyvumus priimta, kad name nėra įrengta saulės kolektorių karšto vandens ruošimui sistema. Skaičiuojami šilumos siurblių ciklai su 1,5 kW kompresoriaus vartojamąja galia. Šilumos siurblys dirba su R407C šaldymo agentu.

Visos gautos reikšmės gautos skaičiavimuose yra teorinės ir gali skirtis nuo praktinių reikšmių.

Skaičiavimams naudojami daugiamečiai oro ir grunto temperatūros metų bėgyje vidurkiai, kurie pateikti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Vidutinės mėnesio oro ir grunto temperatūros [3]

	Sau.	Vas.	Kov.	Bal.	Geg.	Bir.	Lie.	Rugp.	Rugs.	Spa.	Lap.	Gruo.
Lauko temp., °C	-5	-4	1	6	13	16	17	17	12	7	2	-3
Grunto temp., °C	5	5	5	6	7	8	8	8	8	8	7	6

Pirmiausiai paskaičiuojami šildymo sezono darbo efektyvumai. Analizuojamas geoterminio šilumos siurblio ciklas spalio mėnesį, kai ruošiamas 35 °C vanduo ir grunto temperatūra 8 °C. Su tokiais parametrais, kondensacijos temperatūra bus $t_{kond.} = 40\text{ °C}$, garavimo temperatūra $t_{gar.} = 3\text{ °C}$, perkaitimas 5 °C, peraušinimas 0 °C, kompresoriaus efektyvumas 80 %.

Pagal R407C agento log(p)-h diagramoje nubraižytą ciklą (1 priedas) nustatoma, kad garavimo metu šaldymo agentas priėmė $q_{gar.} = 165,12\text{ kJ/kg}$ šiluminės energijos. Kompresorius suspausdamas garus sunaudojo $q_{komp.} = 34,84\text{ kJ/kg}$ energijos. Kondensatoriuje atiduota $q_{kond.} = 199,95\text{ kJ/kg}$. Su šiais duomenimis ir žinant kompresoriaus vartojamąją galią pagal (2) formulę paskaičiuojamas reikalingas šaldymo agento masinis debitas.

$$G_c = \frac{W_{komp.}}{q_{komp.}} \quad (2)$$

čia G_c – ciklo agento masinis debitas, kg/s; $W_{komp.}$ – kompresoriaus vartojama galia, kW; $q_{komp.}$ – kompresoriaus cikle sunaudojama energija, kJ/kg.

$$G_c = \frac{1,5\text{ kW}}{34,84\text{ kJ/kg}} = 0,043\text{ kg/s}$$

Panaudojus (3) formulę gaunamas kondensatoriaus šildymo pajėgumas.

$$Q_{kond.} = G_c \cdot q_{kond.} \quad (3)$$

čia $Q_{kond.}$ – kondensatoriaus šildymo galia, kW.

$$Q_{kond.} = 0,043\frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 199,95\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 8,6\text{ kW}$$

Turint šiuos duomenis panaudojama (1) formulė ciklo efektyvumo paskaičiavimui:

$$COP_H = \frac{8,6 \text{ kW}}{1,5 \text{ kW}} = 5,73$$

Toliau paskaičiuojamas tokios pat sistemos, tik ruošiant 55 °C karštą vandenį, ciklo efektyvumas. Tokiu atveju $t_{kond.} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Kiti parametrai išlieka tokie patys. Ciklo grafikas pateiktas 1 priede. Iš jo gaunami duomenys: $q_{gar.} = 125,47 \text{ kJ/kg}$, $q_{komp.} = 50,63 \text{ kJ/kg}$, $q_{kond.} = 176,1 \text{ kJ/kg}$.

Pagal 2 formulę paskaičiuojamas ciklo masinis debitas:

$$G_c = \frac{1,5 \text{ kW}}{50,63 \text{ kJ/kg}} = 0,0296 \text{ kg/s}$$

Kondensatoriaus galingumui panaudojame 3 formulę:

$$Q_{kond.} = 0,0296 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 176,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 5,22 \text{ kW}$$

Galiausiai skaičiuojamas efektyvumas:

$$COP_H = \frac{5,22 \text{ kW}}{1,5 \text{ kW}} = 3,48$$

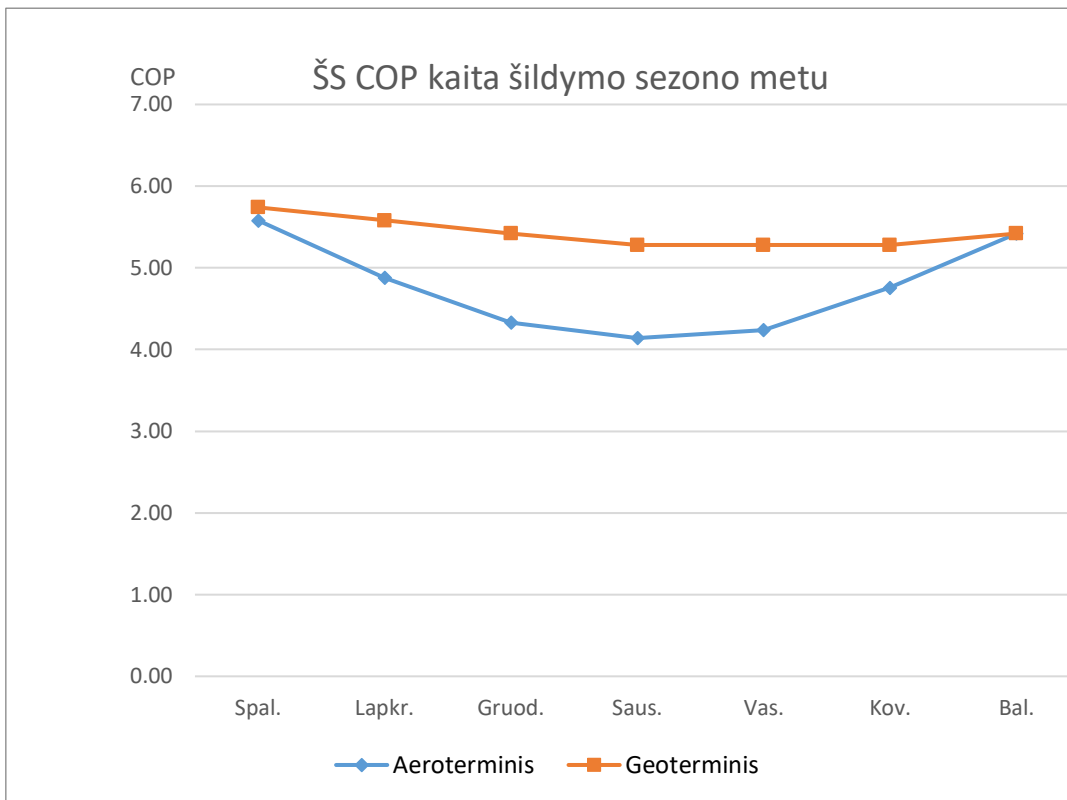
Tokiu pat metodu paskaičiuojami ir likusių šildymo sezono mėnesių šildymo ciklo efektyvumai, bei visų metų karšto vandens ruošimo efektyvumai (2 priedas). Priimta, kad karštas vanduo ruošiamas be papildomo kaitinimo elemento pagalbos. Rezultatai pateikti 1.2 ir 1.3 lentelėse.

1.2 lentelė. Ciklo efektyvumų šildymo sezono metu palyginimas

COP šildymo sezono metu	Spal.	Lapkr.	Gruod.	Saus.	Vas.	Kov.	Bal.
Geoterminis	5,74	5,58	5,42	5,28	5,28	5,28	5,42
Aeroterminis	5,58	4,88	4,33	4,14	4,24	4,76	5,42

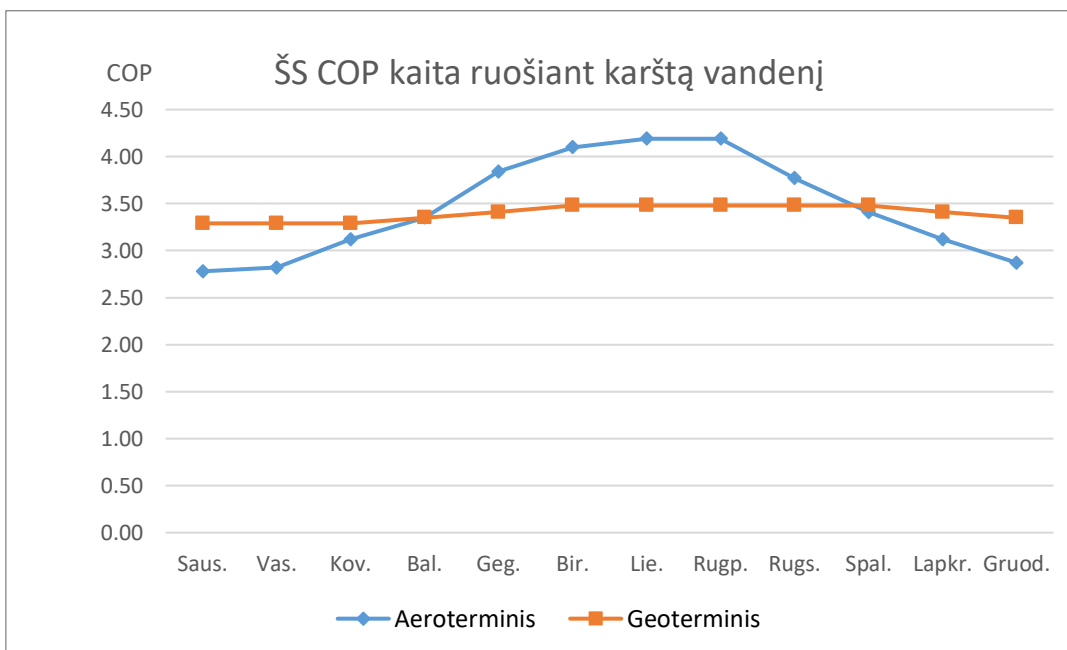
1.3 lentelė. Ciklo efektyvumų palyginimas ruošiant karštą vandenį

K. v. ruošimo COP	Sau.	Vas.	Kov.	Bal.	Geg.	Bir.	Lie.	Rugp.	Rugs.	Spa.	Lap.	Gruo.
Geoterminis	3,29	3,29	3,29	3,35	3,41	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,41	3,35
Aeroterminis	2,78	2,82	3,12	3,35	3,84	4,10	4,19	4,19	3,77	3,41	3,12	2,87



1.4 pav. Ciklo efektyvumo šildymo sezono metu palyginimas.

ŠS – šilumos siurblio



1.5 pav. Ciklo efektyvumo palyginimas ruošiant karštą vandenį.

ŠS – šilumos siurblio

1.2.2. Šilumos siurblių įsirengimo kainų palyginimas

Rinkoje šiuo metu dominuoja aeroterminiai šilumos siurbliai. Taip yra dėl jų žemesnės įsirengimo kainos. Nors ir geoterminiai šilumos siurbliai yra efektyvesni, tylesni ir patikimesni, tačiau Lietuvoje galutiniam sprendimui didžiausią įtaką daro kaina. Skaičiuojant įsirengimo išlaidas priimamas 9 kW šildymo pajėgumo įrenginys. Gręžimo darbai kainuoja 23,5 eurų už metrą, skaičiuojami 2 gręžiniai po 90 metrų. Visos kainos nurodytos su PVM.

1.4 lentelė. Šilumos siurblių įsirengimo kainos

	Gruntinis siurblys	Aeroterminis siurblys
Įrenginio kaina	5500	6500
Grunto darbų kaina	4230	0
Montavimo darbai	1200	1000
Iš viso, Eur	10930	7500

Iš 1.4 lentelėje pateiktų duomenų matoma, kad įsirengiant namuose aeroterminio šildymo sistemą sutaupoma 3430 eurų, lyginant su geoterminine sistema, tai sudaro 31,4 % geoterminio šilumos siurblio įsirengimo kainos.

1.2.3. Eksploatacinių išlaidų palyginimas

Skaičiuojant įvertinamos pačio šilumos siurblio kaip viso įrenginio valandinės energijos sąnaudos, įvertinamos vidutinės darbo valandos per parą ir paskaičiuojamos vidutinės kiekvieno mėnesio planuojamas elektros sąnaudos pagal (4) formulę:

$$E_{ss} = E_p \cdot n \quad (4)$$

čia E_{ss} – šilumos siurblio per mėnesį suvartojama elektros energija; E_p - šilumos siurblio per parą suvartojama elektros energija; n – mėnesio dienų kiekis.

Šilumos siurblio per parą suvartojama elektros energija E_p skaičiuojama dauginant kompresoriaus vartojamąją galią P_k iš šilumos siurblio darbo valandų skaičiaus h (5):

$$E_p = P_k \cdot h \quad (5)$$

Vidutinės šilumos siurblio paros darbo valandos, atsižvelgus į sumažėjusį COP žiemos metu ir atitirpinimo darbo laiką, pateiktos 1.5 lentelėje:

1.5 lentelė. Šilumos siurblių vidutinės darbo valandos paros bėgyje

Darbo valandos	Sau.	Vas.	Kov.	Bal.	Geg.	Bir.	Lie.	Rugp.	Rugs.	Spa.	Lap.	Gruo.
Geoterminis	14	14	13	10	5	4	4	4	7	9	12	13
Aeroterminis	18	18	14	10	4	3	3	3	6	9	13	16

Kompresoriaus vartojamoji galia yra 1,5 kW. Pasinaudojant 4 ir 5 formulėmis paskaičiuotos įrenginio elektros suvartojimo prognozės, kurios pateiktos 1.6 lentelėje.

1.6 lentelė. Šilumos siurblių mėnesinės elektros suvartojimo prognozės

Elektros suvartojimas, kWh	Sau.	Vas.	Kov.	Bal.	Geg.	Bir.	Lie.	Rugp.	Rugs.	Spa.	Lap.	Gruo.
Geoterminis	651	588	617	450	209	159	168	168	293	410	535,2	604,5
Aeroterminis	837	756	651	450	186	135	139	139,5	270	418	585	744

Priimant, kad elektros kaina šiuo metu yra 12 ct / kWh [4], galima paskaičiuoti eksploatacines išlaidas:

1.7 lentelė. Šilumos siurblių mėnesinės eksploatacines išlaidos

Eksploatacinės išlaidos, eur	Sau.	Vas.	Kov.	Bal.	Geg.	Bir.	Lie.	Rugp.	Rugs.	Spa.	Lap.	Gruo.
Geoterminis	78,1	70,6	74,1	54	25,1	19	20	20,2	35,1	49	64,2	72,5
Aeroterminis	100	91	79	54	22	16	17	16,7	32,4	50	70,2	89,3

Pagal surinktus duomenis galima palyginti šių dviejų šilumos siurblių tipų teorines eksploatacines išlaidas. Duomenys pateikti 1.8 lentelėje.

1.8 lentelė. Geoterminio ir aeroterminio šilumos siurblių palyginimas

	Gruntinis siurblys	Aeroterminis siurblys
Vidutinis šildymo COP	5,43	4,76
Karšto vandens ruošimo COP	3,4	3,46
Elektros suvartojimas per metus	4853,12	5311,5
Elektros kaina už kWh	0,12	0,12
Metinės šildymo sąnaudos, EUR	582,37	637,4

Pagal gautus palyginamosios analizės rezultatus matoma, kad aeroterminio šilumos siurblio įsirengimo sąnaudos 31,4 % mažesnės, tačiau metinės šildymo sąnaudos 9,45 % didesnės nei geoterminio šilumos siurblio.

2. Darbo agentų naudojamų šilumos siurbliuose analizė

2.1. Darbo agentas

Šaldymo agentas (freonas) - tai substancija arba mišinys, naudojama kompresorinėse šaldymo arba šildymo sistemose, kuri nuolat keičia agregatines būsenas – iš skystos į dujinę ir atvirkščiai. Išnaudojant šią šaldymo agentų savybę, bei reguliuojant slėgį, šilumos siurbliuose žemo potencialo šiluma paverčiama aukšto potencialo, kuri panaudojama patalpų šildymui arba karšto vandens ruošimui. Šaldymo įrenginiuose ciklas yra atvirkščias, kai šiluma imama iš patalpos ir atiduodama laukui. Visa tai yra įmanoma dėl šaldymo agentų inertiškumo – savybės, dėl kurios jiems norint pakeisti agregatinę būseną reikalingi dideli energijos kiekiai.

Idealus šaldymo agentas turėtų geras termodinamines savybes, būtų nekorozinis mechaninėms dalims, būtų saugus, netoksiškas ir nedegus. Toks agentas nekeltų ozono ardymo ar klimato kaitos. Tačiau kadangi tokio idealaus šaldymo agento nėra, atrenkami šaldymo agentai atitinkantys „aukso viduriuką“.

Daugumos haloalkanų, chlorfluorangliavandenilių (CFC) ir hidrochlorfluorangliavandenilių (HCFC), ypač CFC-11 ir CFC-12 inertiškumas juos padaro geriausiu pasirinkimu tarp šaldymo agentų jau daugelį metų, kadangi jie taip pat yra nedegūs ir netoksiški. Tačiau jų stabilumas atmosferoje ir ozono sluoksnio ardymas, bei klimato šiltėjimo sukėlimas skatina naujų šaldymo agentų ieškojimą. Juos pakeitė HFC (hidrofluoroangliavandenilis) ir PFC (fluorokarbonas). Nors ir šie agentai vis tiek skatina klimato šiltėjimą tūkstančius kartų sparčiau negu CO₂, tačiau jie neardo ozono sluoksnio. [5]

2.2. Šaldymo agentų klasifikavimas

Šaldymo agentai gali būti suskirstyti į tris klases pagal jų galimybę priimti arba atiduoti šilumą:

1 klasė: Į šią klasę patenka agentai, kurie šaldo fazių kaitos metu (dažniausiai virimo metu), dėl agento latentinės šilumos.

2 klasė: Šios klasės agentai šaldo temperatūros kitimu arba „jautriąja šiluma“. 2 klasės agentų tikslas yra gauti temperatūros sumažinimą iš 1 klasės agentų ir perteikti šią žemesnę temperatūrą į norimą atvėsinti patalpą.

3 klasė: Ši grupė susideda iš sprendimų, kurių sudėtyje yra susigėrusių skystųjų agentų arba šaldymo terpės garų. Tokie sprendimai veikia dėl jų galimybės nešti skystuosius garus, kurie sukelia šaldymo efektą, absorbuodami sprendimo šilumą.

Klasifikavimas pagal cheminę sudėtį:

2.1 lentelė. Šaldymo agentų klasifikavimas pagal cheminę sudėtį

Grupė	Kodas	ODP	GWP (100 m.)
CFC	R11	1	4750
	R12	1	10900
HCFC	R22	0,055	1810
HFC	R134a	0	1430
	R404A	0	3922
	R407C	0	1774
	R410A	0	2088
HFO	R1234yf	0	4
Behalogeniai	R717	0	0
	R600a	0	3

- CFC - chlorofluorocarbon (chlorofluoroangliavandenilis)
- HCFC – hydrochlorofluorocarbon (hidrochlorofluoroangliavandenilis)
- HFC - hydrofluorocarbon (hidrofluoroangliavandenilis)
- HFO - hydrofluoro-olefin (hidrofluoroolefinas)
- HC - hydrocarbon (angliavandenilis)

ODP – ozono ardymo potencialas (*Ozone Depletion Potential*). Ką jis reiškia? Pvz. šaldymo agento ODP = 0,5 – tai reiškia, kad duotas šaldymo agento kiekis per nustatytą laiką sunaikins pusę to ozono sluoksnio molekulių, kurias sunaikintų tas pats kiekis CFC-11 (R11) per tą patį laiką.

Jis nustatomas ODP laboratorinių tyrimų pagrindu, apskaičiuojamas matematiškai pagal tam tikrą modelį, įvertinantį:

- Produkto stabilumą;
- Difuzijos laipsnį;
- Atskylančių nuo molekulės atomų skaičių – chloro ir bromo;
- Ultravioletinių spindulių ir kitokio tipo spinduliavimo poveikį molekulei.

GWP – globalinio atšilimo potencialas (*Global Warming Potential*):

- Globalinis atšilimas ≠ Šiltnamio efektas;
- Globalinis atšilimas – Antrinis šiltnamio efektas;
- Lyginamas poveikis su CO₂ poveikiu atmosferai;
- CO₂ – alternatyvus šaldymo agentas;
- GWP reikšmė nustatoma kažkokiam laikotarpiui: 20, 50, 100 metų – atkreipti dėmesį lyginant. [6]

2.3. Darbo agentų pavadinimų dekodavimas

Kiekvienas darbo agentas turi būtent tokį savo pavadinimą ne atsitiktinai. Pavadinime atsispindi jo cheminės savybės. 2.2 lentelėje pateikta agentų skaičių pavadinimuose reikšmės.

2.2 lentelė. Skaičių agentų pavadinime reikšmės

Pirmas skaičius iš dešinės	F	Fluoro atomų skaičius
Antras skaičius iš dešinės	H	Vandenilio atomų skaičius plus 1
Trečias skaičius iš dešinės	C	Anglies atomų skaičius minus 1

Pavyzdžiui:

R 1 3 4 a

4 – keturi fluoro atomai

3 – du vandenilio atomai ($3 - 1 = 2$)

1 – du anglies atomai ($1 + 1 = 2$)

Cheminė sudėtis - $C_2H_2F_4$

Jei pirmas skaičius po R yra 4 arba 5, tai reiškia, kad tai yra mišinys.

Alternatyvi dekodavimo metodika

- Pradžia 0, 1, 2 :
- Triženklis skaičius (dviženklis) + 90
- Pvz.:
- $134 + 90 = 224$ (C-2, H-2, F-4)
- $012 + 90 = 102$ (C-1, H-0, F-2) – dvi laisvas valentines vietas užima 2 chloro atomai
- $022 + 90 = 112$ (C-1, H-1, F-2) – vieną laisvą valentinę vietą užima 1 chloro atomas

Raidžių gale reikšmės:

Mažoji raidė gale (a, b, ...):

- Izomeras
 - R134a - CF_3-CH_2F
 - R134 - CHF_2-CHF_2
- Jei dar galimi izomerai – žymima : b, c, d, ...

Didžioji raidė gale (A,B,C,...) – parodo, kad yra skirtinga mišinio procentinė sudėtis – komponentai tie patys.

Pavyzdžiai:

- R407C – R32/R125/R134a – 23/25/52
- R410A – R32/R125 – 50/50

2.3 lentelė. Senųjų šaldymo agentų pakeitimo alternatyvos

Senieji	Alternatyvos			
	ASHRAE klasifikacija	Prekybinis ženklas	Gamintojas	Mišinių sudėtis
R12	R134a R152a R437A HFO-1234yf	- - ISCEON MO49 Plus Skirtingas	DuPont	- - R125/134a/600/601
R502 / R22	R404A R507A R422A	Skirtingas Skirtingas ISCEON MO79	DuPont	R143a/125/134a R143a/125 R125/134a/600a
R22	R407A R407C R407F R410A R417A R417B R422D R427A R438A	Skirtingas Performax LT Skirtingas ISCEON MO59 Solkane 22L ISCEON MO29 Forane 427A ISCEON MO99	Mexichem Honeywell DuPont Solvay DuPont Arkema DuPont	R32/125/134a R32/125/134a R32/125/134a R32/125 R125/134a/600 R125/134a/600 R125/134a/600a R32/125/143a/134a R32/125/134a/600/601a

Retrofitas (*Retrofitting*) – senojo šaldymo agento sistemoje pakeitimas alternatyviu šaldymo agentu, minimaliai pakeičiant sistemos šalčio našumą. Vietoje viso įrenginio pakeitimo užtenka pakeisti tik keletą egzistuojančios sistemos dalių ar komponentų.

Paprastai keičiama:

- Tepalas;
- Droseliavimo įrenginys (TRV);
- Filtras sausintuvas.

Populiariausias buvęs retrofito atvejis: R12 pakeitimas R134a.

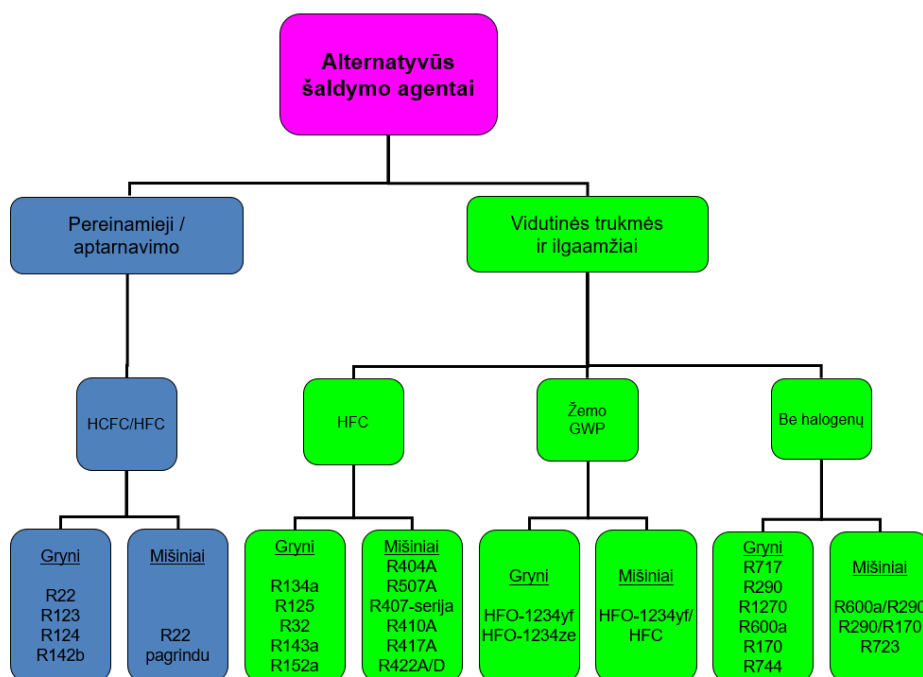
Tiesioginis pakeitimas – procedūra, kai veikiančiose šaldymo, oro kondicionavimo sistemose, šilumos siurbliuose CFC šaldymo agentas pakeičiamas be jokių įrenginio pakeitimų.

Techninės mišinių problemos:

- Zeotropiniai mišiniai – ramybės būsenoje išsisluoksniuoja;
- Atsiradus nuotėkiui, gali pasikeisti mišinio sudėtis – nebus palaikomas temperatūrinis režimas;
- Rezultatas – reikia keisti sistemoje visą šaldymo agento kiekį;
- Nekondicinį mišinį galima atstatyti – šaldymo agentas siunčiant gamintojui arba jo atstovams.

Zeotropiniai mišiniai: R4...

- Šaldymo agentai su “*glide*” – kai kondensacijos ir išgarinimo metu keičiasi temperatūra;
- R407C, R410A;
- R404A – artimas azeotropiniams.



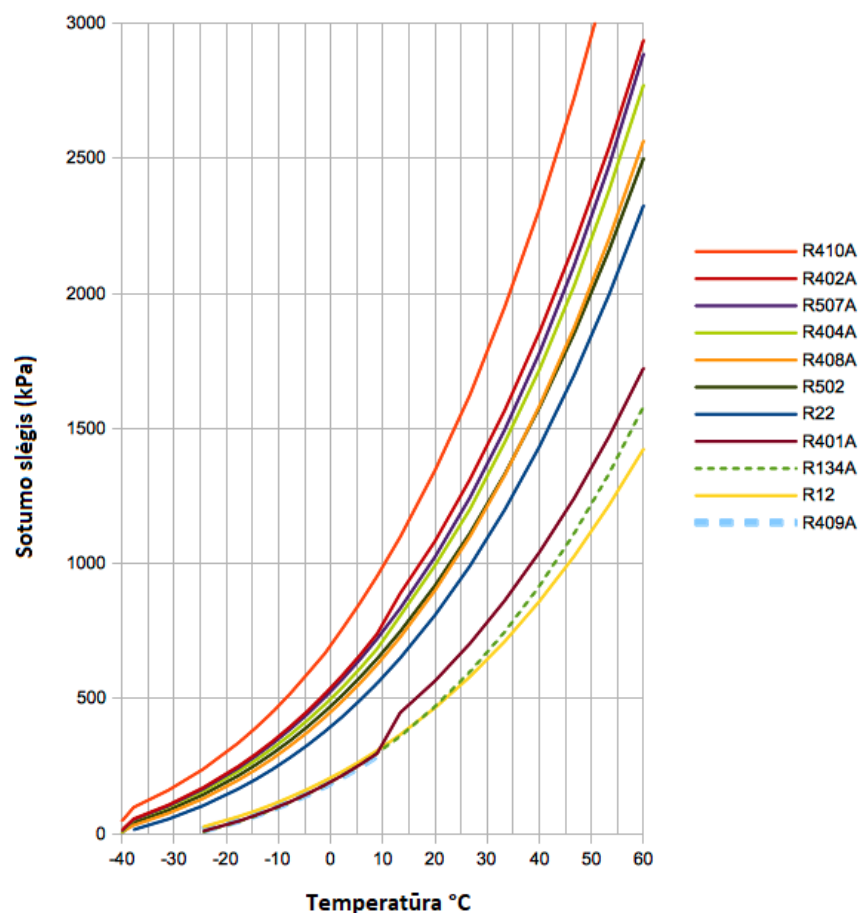
2.1 pav. Šaldymo agentų alternatyvos

2.4 lentelė. Šaldymo agentų klasifikavimas pagal GWP

GWP grupė	GWP	Šaldymo agentai	Pastaba
Labai žemas	nuo 0 iki 10	NH ₃ , CO ₂ , HC, HFO	Saugos problemos: degumas, toksiškumas, aukštas slėgis
Žemas/nuosaikus	nuo 200 iki 1400	Galimi: R32, R245fa Būsiami: HFO mišiniai	R32 degus
Vidutinis	nuo 1430 iki 2107	R134a, R407A, R407C, R407F, R410A	Visi nedegūs
Aukštas	3900	R404A, R507	R404A šiuo metu yra dominuojantis ES

Šaldymo agentai

Sotumo temperatūros - slėgio grafikas



2.2 pav. Populiariausių šaldymo agentų temperatūros priklausomybė nuo slėgio [7]

2.4. Šaldymo agentų pageidautinos termodinaminės savybės

2.4.1. Virimo taškas

Žema virimo temperatūra esant atmosferiniam slėgiui yra gan svarbi savybė. Kuo virimo taškas esant atmosferiniam slėgiui yra didesnis, tuo kompresorius turi dirbti su didesniu vakuumu.

2.5 lentelė. Šaldymo agentų virimo temperatūros [8]

Agento pavadinimas	Virimo taškas , 1 atm
R-12	-29.8°C
R-22	-41.3°C
R-134a	-26.22°C
CO ₂	-78.00°C

2.4.2. Užšalimo taškas

Agento užšalimo taškas labai svarbus, nes jis neturėtų užšalti prie reikiamos garavimo temperatūros. Pageidautina, kad agentas turėtų žymiai žemesnę užšalimo temperatūrą, nei garintuvo darbinės temperatūros.

2.6 lentelė. Šaldymo agentų užšalimo temperatūros [8]

Agento pavadinimas	Užšalimo taškas, 1 atm
R-12	-157.8°C
R-22	-160°C
CO ₂	-56.70°C

2.4.3. Garavimo ir kondensavimosi slėgiai

Visada geriausia turėti teigiamą slėgį garintuve ir kondensatoriuje reikiamoms temperatūroms. Tačiau slėgiai neturėtų būti per daug didesni nei atmosferiniai slėgiai. Per aukšti slėgiai reikalauja labai tvirtos konstrukcijos ir daugiau investicijų. Taip pat teigiamas slėgis būtinas norint apsaugoti nuo oro patekimo į sistemą.

Darbo ribos yra vienas iš pagrindinių kriterijų pasirenkant šaldymo agentą kompresorinei sistemai. Kuo didesnis skirtumas tarp garavimo ir kondensacijos slėgių, tuo daugiau darbo reikia atlikti kompresoriui ir taip krenta sistemos ekonomiškumas.

2.4.4. Kritinės temperatūros ir slėgiai

Kritinė garo temperatūra apibūdinama kaip temperatūra virš kurios garas nebegali susikondensuoti nepriklausomai nuo esamo slėgio. Naudojamo agento kritinė temperatūra turi būti aukštesnė nei ta, kuri reikalinga kondensatoriuje.

2.4.5. Agento latentinė šiluma

Didelė latentinė agento šiluma reikalingoje garavimo temperatūroje labai pageidautina. Kuo didesnė agento latentinė šiluma, tuo daugiau jis energijos priima garuodamas, be to, tuo mažiau reikia pačio agento sistemoje, ir tai sumažina investicinius kaštus.

2.5. Šaldymo agentų analizė

2.5.1. R407C agento savybės

Cheminė formulė: $CH_2F_2/CHF_2CF_3/CH_2FCF_3$, (23/25/52 % pagal svorį).

R407C yra zeotropinis mišinys R-32 (difluorometano), R-125 (pentafluoroetano) ir R-134a (1,1,1,2-Tetrafluoroetano) hidrofluoroangliavandenilių, naudojamas kaip šaldymo agentas ir priklausantis HFC agentų grupei. R-32 paskirtis priimti šilumą, R-125 sumažina mišinio degumą, o R-134a sumažina darbinius slėgius. Šis šaldymo agentas tarptautiniu susitarimu žymimas tamsiai oranžine spalva.

R-407C naudojamas kaip pakaitalas R-22 šaldymo agentui, kadangi jo aplinkosauginės savybės yra daug geresnės. Pagal Monrealio protokolą, R-22 šaldymo agentas turėtų būti visiškai pašalintas iš

rinkos iki 2020 m. Pagrindinės panaudojimo sritys yra vidutinių temperatūrų komerciniai ir pramoniniai tiesioginio išgarinimo šaldymo įrenginiai ir oro kondicionavimo sistemos.

Nors R-407C ir yra R-22 agento pakaitalas, tačiau nerekomenduojama R-22 užpildytą sistemą papildyti R-407C, esant agento trūkimui. Tokiu atveju reikia visiškai ištraukti senąjį agentą ir sistemą užpildyti R-407C.

Šis agentas kompresorinėje sistemoje turi dirbti su poliesterio tepalu (POE), kadangi jo tirpumas su mineraliniu tepalu arba su alkilbenzenu yra ribotas. Pildomas į sistemą turi būti tik skystos fazės. Dėl jo zeotropinio pobūdžio, agentas, pildomas dujinės fazės, gali skilti į atskirus agentus ir taip sistemoje bus pakitusios sudėties mišinys, dėl kurio suprastės sistemos darbas ir net galimi gedimai. [9]

2.7 lentelė. R407C šaldymo agento fizikinės savybės [10]

Fizinės šaldymo agento savybės	R-407C
Aplinkosauginė klasifikacija	HFC
Molekulinė masė	86.2
Virimo taškas (1 atm. °C)	-42
Kritinis slėgis (bar)	46.3
Kritinė temperatūra (°C)	86.1
Kritinis tankis (kg/m ³)	512.6
Skystos fazės tankis (21 °C, kg/m ³)	1160
Garų fazės tankis (vir.taško, kg/m ³)	4.63
Savitoji garavimo šiluma (vir. taško, kJ/kg)	248.2
Specifinė skystos fazės šiluma (21 °C, kJ/kg. °C)	0.83
Specifinė garų fazės šiluma (1 atm, 21 °C, kJ/kg. °C)	0.46
Ozono ardymo potencialas (CFC 11 = 1.0)	0
Klimato kaitos potencialas (CO ₂ = 1.0)	1770
ASHRAE Standard 34 saugumo reitingas	A1
Temperatūros „slydimas“ (°C)	5.5

2.5.2. R410A agento savybės

R410A šaldymo agentas yra zeotropikas, bet ir beveik azeotropinis difluorometano (CH_2F_2 , dar vadinamo R-32) ir pentafluorometano (CHF_2CF_2 , vadinamo R125) mišinys, kuris naudojamas oro kondicionieriuose ir šilumos siurbliuose. Tarptautiniu susitarimu žymimas rožine spalva.

Agentas išrastas 1991 metais „AlliedSignal“ kompanijos (dabar vadinama „Honeywell“). R-410A šaldymo agentas sėkmingai įsiliejo į oro kondicionavimo pramonę, kai pavyko tapti partneriais su oro kondicionavimo sistemų ir kompresorių gamintojais. Pagrindinis R-410A šaldymo agento sukūrimo tikslas buvo R-22 agento pakeitimas buitinėse ir komercinėse ŠVOK (Šildymas, Vėdinimas, Oro Kondicionavimas) sistemose. Kadangi R-410A agento darbui reikalingi didesni slėgiai nei kitiems šaldymo agentams, jam gaminamos atskiros sistemos komponentės, kurios gali būti naudojamos tik su šiuo agentu. Kompresoriaus tepalas turi būti pagamintas iš poliesterio. Dėl didesnių slėgių ir didesnės rizikos, atitinkamai ir specialistai, dirbantys su šiuo agentu, turi būti specialiai išmokyti ir žinoti kaip elgtis.

Pagal Monrealio protokolą, R-22 šaldymo agentą draudžiama dėti į naujas sistemas, o nuo 2020 metų ši agentą bus uždrausta gaminti ir importuoti į ES ir JAV rinkas. R-22 turi būti visiškai pakeistas R-410A. [11]

2.8 lentelė. R410A šaldymo agento fizikinės savybės [12]

Fizinės šaldymo agento savybės	R-410A
Aplinkosauginė klasifikacija	HFC
Molekulinė masė	72.6
Lydimosi taškas (1 atm. °C)	-155
Virimo taškas (1 atm. °C)	-51.67
Kritinis slėgis (bar)	47.7
Kritinė temperatūra (°C)	70
Kritinis tankis (kg/m ³)	552.6
Skystos fazės tankis (30°C, kg/m ³)	1085
Garų fazės tankis (vir.taško, kg/m ³)	4.18
Savitoji garavimo šiluma (vir.taško, kJ/kg)	271.7
Specifinė skystos fazės šiluma (21°C, kJ/kg. °C)	0.92
Specifinė garų fazės šiluma (1 atm, 21°C, kJ/kg. °C)	0.45
Ozono ardymo potencialas (CFC 11 = 1.0)	0
Klimato kaitos potencialas (CO ₂ = 1.0)	2088
ASHRAE Standard 34 saugumo reitingas	A1
Temperatūros „slydimas“ (°C)	0.1

R-410A šaldymo agentas neprisideda prie ozono sluoksnio ardymo, dėl to jis vis labiau populiarėja. Tačiau jis turi labai didelį pasaulinio atšilimo potencialą (1700 kartų didesnis nei anglies dioksido), kuris yra panašus į R-22. Tačiau R-410A turi didesnę SEER (sezoninis energijos efektyvumo santykis) rodiklį. Dėl mažesnių darbo energijos sąnaudų bendrasis pasaulinio atšilimo potencialas R-410A yra mažesnis nei R-22, kadangi įvertinama tarša, kuri susidaro gaminant elektrą jėgainėse.

2.5.3. R22 agento savybės

R-22 (chluorodifluorometanas) yra hidrofluoroangliavandenilis (HCFC). Dažnai naudojamas varikliams sukurti arba kaip šaldymo agentas kompresorinėse sistemose. R-22 yra netoksiškas ir nedegus, todėl puikiai tinka buitinių ir komercinių sistemų naudojimui. Šio agento išpurškimo temperatūros gana aukštos, tad perkaitimas tokiose sistemose turėtų būti minimalus. R-22 gana lengvai maišosi su tepalu esant kondensacijos temperatūroms, tačiau garuodamas dažnai atsiskiria nuo tepalo. Jei garintuvas ir patraukimo linija suprojektuota tinkamai, problemų dažniausiai nekyla.

Labiau išsivysčiusiose šalyse šis šaldymo agentas po truputį šalinamas iš rinkos dėl jo aukštų ozono sluoksnio ardymo (ODP) ir pasaulinio atšilimo skatinimo (GWP) rodiklių. Tarptautiniu susitarimu žymimas šviesiai žalia spalva.

R-22 agento privalumai lyginant su R-11:

- R-22 ozono ardymo potencialas yra tik 5% R-11 vertės;

- tokio pat galingumo sistemose su R-22 reikia tik 60 % agento kiekio lyginant su R-11;
- geresnė vandens absoravimo galimybė, kuri labai svarbi žemų temperatūrų sistemose, nes patekęs vanduo į R-22 sistemą sukelia daug mažiau problemų. [13]

2.9 lentelė. R22 šaldymo agento fizikinės savybės [14]

Fizinės šaldymo agento savybės	R-22
Aplinkosauginė klasifikacija	HCFC
Molekulinė masė	86.5
Virimo taškas (1 atm. °C)	-40.8
Kritinis slėgis (bar)	49.9
Kritinė temperatūra (°C)	96
Kritinis tankis (kg/m ³)	523.8
Skystos fazės tankis (30°C, kg/m ³)	1206.2
Garų fazės tankis (vir.taško, kg/m ³)	4.7
Savitoji garavimo šiluma (vir.taško, kJ/kg)	233.7
Specifinė skystos fazės šiluma (21°C, kJ/kg. °C)	0.69
Specifinė garų fazės šiluma (1 atm, 21°C, kJ/kg. °C)	0.36
Ozono ardymo potencialas (CFC 11 = 1.0)	0.05
Klimato kaitos potencialas (CO ₂ = 1.0)	1810
ASHRAE Standard 34 saugumo reitingas	A1

2.5.4. R134a agento savybės

Mokliškai vadinamas 1,1,1,2-Tetrafluoroetanu. Jis yra halogenalkano šaldymo agentas su labai panašiomis termodinaminėmis savybėmis į R-12 agentą, tačiau žymiai mažesniu ozono ardymo potencialu ir šiek tiek mažesniu klimato šiltėjimo potencialu. Cheminė formulė: CH₂FCF₃. Tarptautiniu susitarimu žymimas šviesiai mėlyna spalva. Yra svarstymų pašalinti šį šaldymo agentą iš rinkos ir pakeisti mažiau klimato šiltėjimą sukeliančiu agentu, tokiu kaip HFO-1234yf.

R-134a yra nedegios dujos, daugiausiai naudojamos kaip aukštų temperatūrų šaldymo agentu buitiniam šaldymui arba automobilių kondicionavimui. Rinkoje jis pasirodė 1990-aisiais, kaip pakaitalas labiau aplinkai pavojingam R-12 agentui. Šis agentas taip pat naudojamas plastiko putų pūtimui, kaip valymo tirpiklis, kaip propelentas vaistų pervežimui, elektronikos dulkių nupūtimui ir oro džiovintuvuose, buvo bandoma panaudoti ir kompiuterių aušinimui. R-134a taip pat laikomas kaip organinis tirpiklis skonio ir kvapų išgavimui, taip pat ir kaip alternatyva ir kitiems organiniams tirpikliams, bei superkritiniam anglies dioksidui. Taip pat gali būti naudojamas kaip dielektrikas aukštos įtampos įrenginiuose.

Paskutiniu metu atsiranda vis daugiau kalbų apie šio agento mažinimą rinkoje dėl jo gana aukšto pasaulinio atšilimo potencialo (1300). Automobilių inžinierių draugija (SAE) pasiūlė pakeisti R-134a automobilių kondicionieriuose į HFO-1234yf (CF₃CF=CH₂). Kalifornijos valstijoje planuojama uždrausti pardavinėti R-134a šaldymo agentą automobilių kondicionierių užpildymui ne profesionalams. [15]

2.10 lentelė. R134a šaldymo agento fizikinės savybės [16]

Fizinės šaldymo agento savybės	R-134a
Aplinkosauginė klasifikacija	HFC
Molekulinė masė	102.3
Virimo taškas (1 atm. °C)	-26
Kritinis slėgis (bar)	40.56
Kritinė temperatūra (°C)	101
Kritinis tankis (kg/m ³)	512.6
Skystos fazės tankis (30°C, kg/m ³)	1220.6
Garų fazės tankis (vir.taško, kg/m ³)	5.25
Savitoji garavimo šiluma (vir.taško, kJ/kg)	1494.5
Specifinė skystos fazės šiluma (21°C, kJ/kg. °C)	5.4
Specifinė garų fazės šiluma (1 atm, 21°C, kJ/kg. °C)	3.2
Ozono ardymo potencialas (CFC 11 = 1.0)	0
Klimato kaitos potencialas (CO ₂ = 1.0)	1430
ASHRAE Standard 34 saugumo reitingas	A1

3. Šilumos siurblių darbinio ciklo analizė

Šilumos siurblio veikimas pagrįstas ciklo režimu. Tai reiškia, kad procesai, vykstantys siurblio sistemoje, kartojasi periodiškai. Procesai vyksta šia eiliškumo tvarka:

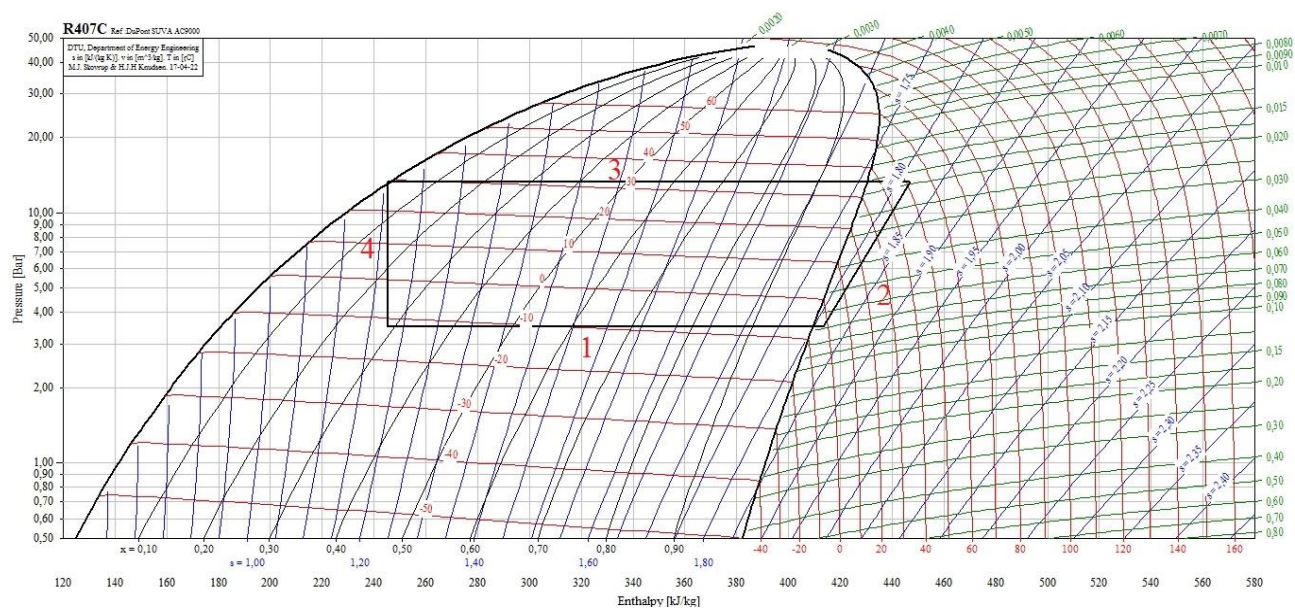
1. garavimas;
2. suslėgimas;
3. kondensavimas;
4. droseliavimas.

Garavimo metu šiluma priimama iš išorinio šilumos šaltinio (oras, gruntas), tada sotūs garai kompresoriuje suslegiami ir šilumokaityje susikondensuoja, atiduoda šilumą namo šildymo sistemai. Paskutinio proceso – droseliavimo metu sumažinamas šaldymo agento slėgis ir ciklas vėl kartojasi (3.1 pav.).

Analizuojamas R407C šaldymo agento ciklas, kai žiemos metu šaldymo agento virimo temperatūra yra $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, kondensavimosi – $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir perkaitimas yra $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pirmojo proceso metu agento entalpija pakinta nuo 245 kJ/kg iki 415 kJ/kg , taigi iš viso pakyla 170 kJ/kg , tai reiškia, kad tiek šilumos jis priėmė iš šilumos šaltinio garuodamas. Antrojo proceso metu kompresoriui suspaudus garus, agento slėgis pakyla nuo $3,6\text{ bar}$ iki 14 bar , tuo pačiu pakyla ir jo temperatūra. Entalpija padidėja nuo 415 kJ/kg iki 445 kJ/kg , iš viso – 30 kJ/kg . Trečiojo proceso metu visa ši gauta šiluma atiduodama šildymo sistemai ir entalpija sumažėja nuo 445 kJ/kg iki 245 kJ/kg , iš viso – 200 kJ/kg . Šiluma atiduota, bet slėgis nesumažėjo, tad paskutinio ketvirto proceso metu jis sumažinamas ir ciklas prasideda iš naujo.

Lyginant su kitu populiariu šaldymo agentu R410A, R407C slėgiai mažesni, pavyzdžiui, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ virimo temperatūroje R407C slėgis yra apie 5 barus, kai tuo tarpu R410A yra 8 barai. Norint pasiekti $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ pirmąjį reikia suslėgti iki 23 barų, o antrąjį – net iki 33 barų.



3.1 pav. R407C šaldymo agento darbinis ciklas

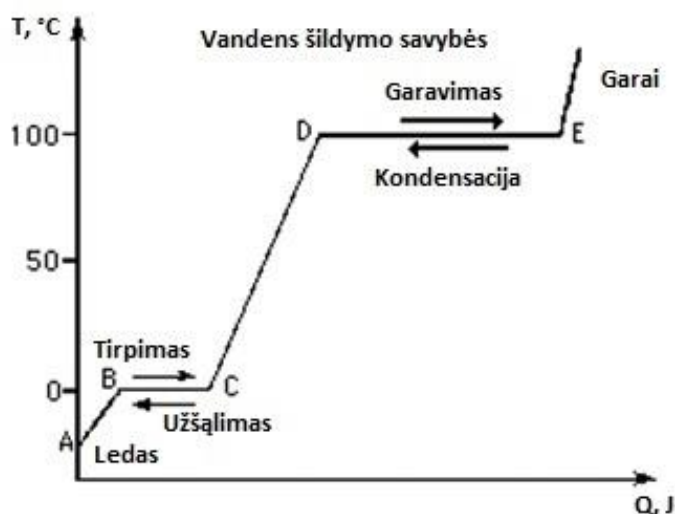
4. Tiesioginio išgarinimo sistemos

4.1. Garavimas

Garavimas – tai izoterminis medžiagos virsmas iš skystos į dujinę agregatinę būseną. Būtent šio virsmo metu gauta energija yra pagrindinė ir didžioji dalis šilumos gaminamos šilumos siurbliuose.

4.1 lentelė. Šaldymo agentų savitoji garavimo šiluma [10][12][14][16]

Šaldymo agentas	Savitoji garavimo šiluma, kJ/(kg·°C)
R407C	248,18
R410A	271,68
R134a	217,02
Vanduo	2260



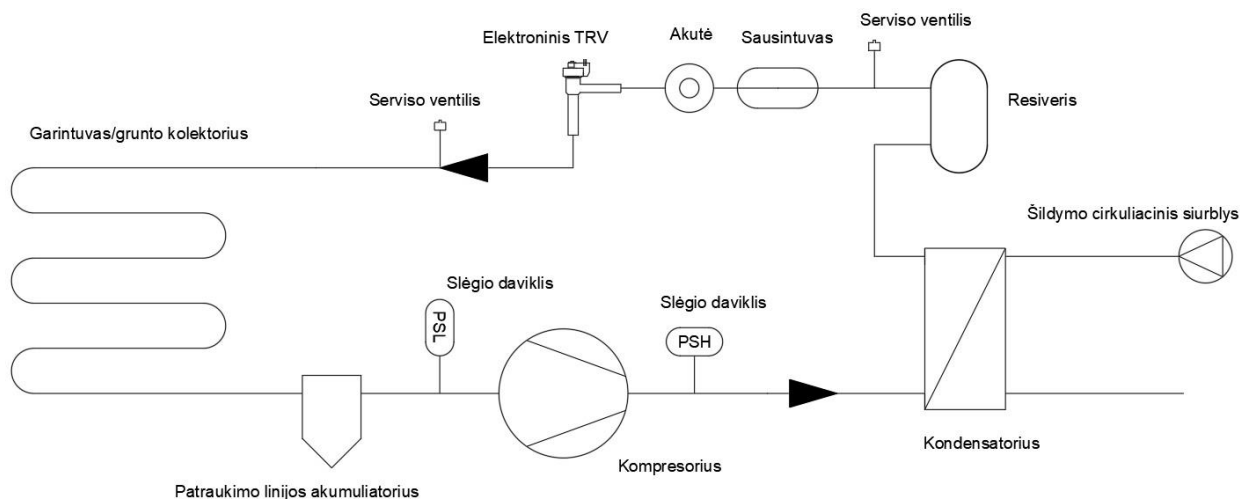
4.1 pav. Vandens šildymo savybės

4.2. Tiesioginis išgarinimas

Tiesioginio išgarinimo terminas vartojamas kalbant apie šildymo arba šaldymo įrenginius, kuriuose nėra papildomo šilumokaičio šaldymo agento išgarinimui, panaudojant fluidą šilumos priėmimui iš šaltinio. Tokiuose įrenginiuose garintuvas tiesiogiai kontaktuoja su šilumos šaltiniu ir taip šaldymo agentas išgaruoja be jokių papildomų šiluminių nuostolių. Dėl to šis metodas yra labai efektyvus. Beveik 100 % šių įrenginių ir naudoja šį energijos priėmimo metodą.

Oras - vanduo šilumos siurblių garintuvas tiesiogiai kontaktuoja su lauko oru. Kondicionieriai, tiek buitiniai, tiek pramoniniai šaldymo įrenginiai turi garintuvus, kurie tiesiogiai kontaktuoja su patalpoje esančiu oru. Vieninteliai gruntas - vanduo šilumos siurbliai turi papildomą garintuvą, kuriame grunto kolektoriaus šilumnešis atiduoda energiją šaldymo agentui. Tačiau šioje sistemoje taip pat galima vietoje papildomo garintuvo nutiesti į gruntą kolektorių, taip sumažinant šilumos perdavimo nuostolius, taip pat nereikia cirkuliacinio siurblio grunto kolektoriui, nes šaldymo agentą stumdo kompresorius. Tokiam kolektoriui reikalingas mažesnis žemės plotas arba gręžinio gylis. Tokia sistema populiari JAV, tačiau Europoje retai naudojama dėl brangesnių įsirengimo išlaidų ir žemesnio

sistemos patikimumo, kuris mažėja dėl gana lengvai pažeidžiamo varinio kolektoriaus grunte. Būtina užtikrinti sistemos sandarumą, atsparumą korozijai (geriausiai, kad grunto pH būtų tarp 5,5 ir 10) ir tai, kad tepalo debitas sistemoje atitiktų kompresoriaus reikalavimus. Taip pat yra ir sistemų, kur tiek garavimui, tiek kondensacijai naudojamas tiesioginis kontaktas, kai ir į šildymo sistemą išvedžiojami variniai vamzdžiai su šaldymo agentu.



4.2 pav. Geoterminio šilumos siurblio su tiesioginiu išgarinimu schema

Tiesioginio išgarinimo sistemos gruntinio šilumos siurblio šaldymo agento temperatūra artimesnė grunto temperatūrai, o tai sumažina šilumos siurblio reikiamą suspaudimo laipsnį, taip sumažindamas pačia sistemą ir energijos sąnaudas. Jeigu grunte pakanka šilumos srauto, galima naudoti trumpesnį grunto kolektorių, kadangi vario šiluminis laidumas yra 6 kartus didesnis nei polietileno vamzdžio, naudojamo tradiciniuose kolektoriuose. Tokie kolektoriai klojami horizontaliai arba suleidžiami į kelis negilius 8 cm skersmens gręžinius. (Amerikoje gręžiami 37 metrų gylio kiekvienam 3,5 kW šaldymo galingumo). Skaičiuojant svarbiausia parinkti tokio ilgio gręžinį, kad jame įvyktų pilnas išgaravimas ir truputi atsargos perkaitinimui.



4.3 pav. Tiesioginio išgarinimo grunto kolektorius [17]

4.3. Žinomos problemos su tiesioginio išgarinimo kolektoriumi

Dažnas susirūpinimas dėl tokių tiesioginio išgarinimo gruntinių kolektorių yra tai, kad varinis vamzdis grunte gali koroduoti ir dėl to atsirasti darbo agento nuotėkis, ko pasekoje teršiama gamta. Tačiau tai yra tik mitas, kadangi varis gaunamas iš gamtos. Jeigu jis natūraliai irty, tada mes jo išvis neturėtume. Daugelyje JAV vietovių variniai vandens vamzdžiai jau paguldyti žemėje daugiau nei 100 metų. Varis yra taurusis metalas, kas reiškia, kad jis atsparus korozijai ir oksidacijai. Tačiau kai kurie rūgščių tipai grunte gali sutrumpinti vario gyvenimo laiką, taip pat kaip ir elektros nuotėkis grunte. Abiejų šių atvejų galima paprastai išvengti, jei į juos atsižvelgiama prieš montuojant sistemą.

Prieš montavimą būtina patikrinti grunto rūgštumą, ar nereikia imtis papildomų priemonių siekiant apsaugoti garintuvą. Be rūgščių rekomenduojama patikrinti chloridų, vandenilio sulfido, sulfatų arba amoniako kiekius grunte. Grunto pH neturi būti mažesnis nei 6. Jei šis skaičius yra žemesnis, reikalinga imti papildomų priemonių.

Rūgštinis gruntas gali būti neutralizuotas paklojant sluoksnį kalkakmenio. Gręžiniai su slėgiu užpildomi skiediniu (tipinis skiedinys susidaro iš 2 tipo cemento, smulkaus silicio smėlio, natrio bentonito, plastifikatoriaus ir vandens).

Varinio kolektoriaus korozijos rūgštiniame grunte galima išvengti sumontuojant auką anodą („*angl. sacrificial anode*“). Tai yra labai aktyvus metalas, naudojamas išvengti mažiau aktyvaus metalo korozijos). Šis anodas turi pilnai susioksiduoti, kol gruntas pradės kenkti kolektoriui.



4.4 pav. Naujas ir sukorodavęs "Aukojamieji anodai" [19]

Kitas dažnai aptariamas scenarijus yra nepakankamas tepalo grįžimas į kompresorių. Taip atsitinka dėl didelių atstumų, kuriuos teka keliauti darbo agentui tokioje sistemoje. Esant gręžiniams tepalas kartus su darbo agentu nukeliauja iki gręžinių, tačiau dėl didesnio tankio dažnai dalis tepalo pasilieka kolektoriuje. Siekiant to išvengti statomi tepalo separatoriai. Tai yra vertikalūs cilindro formos konteineriai. Prie viršutinės separatoriaus dalies prijungiama kompresoriaus išpurškimo linija, o apačioje tepalo grįžimas prijungiamas prie kompresoriaus pasitraukimo linijos. Kartu su darbo agentu išpurškiamas tepalas sugaudoamas separatoriuje ir iškarto, jei reikia grąžinamas į kompresorių, pagal tepalo lygio matuoklį esantį separatoriuje. Pasiekus nustatytą tepalo lygį, atsidaro tepalo lygio adata, kuri truputį praleidžia aukšto slėgio garų į separatoriaus apačią ir taip tepalas nustumiamas į kompresorių. Jų dydis priklauso nuo reikalingo masinio darbo agento debito. Nėra tepalo separatorių, kurių efektyvumas siektų 100 % [18].

4.4. Tiesioginį išgarinimą naudojančios sistemos ir jų analizė

Tiesioginio išgarinimo metodą naudoja beveik visos šaldymo sistemos ir dalis šildymo sistemų. Šaldymo pramonėje tai būtų šaldytuvai ar oro kondicionierius, pramoniniai čiliai, kurių garintuvai tiesiogiai kontaktuoja su patalpomis. Šildymo srityje tiesioginį išgarinimą naudoja tik vieni įrenginiai – geoterminiai šilumos siurbliai.

Tiesioginio išgarinimo kolektoriai gruntiniuose šilumos siurbliuose yra gan retai naudojami dėl brangesnių įrengimo išlaidų, mažesnio patikimumo, dėl lengvai pažeidžiamo vario ir dėl tyrimų stokos apie šio tipo šilumos siurblius.

Pirmieji tyrimai buvo atlikti 1956 metais Smitho, kuris studijavo tiesioginio išgarinimo horizontalių kolektorių ir palygino rezultatus su siurbliais, turinčiais antrinę kolektoriaus kilpą. Jis įrodė, kad naudojant tiesioginį išgarinimą, galima sumažinti kolektoriaus ilgį, bet taip pat ir šilumos absorbavimas turi būti valdomas pagal temperatūrų kitimą grunte. Problema, su kuria jis susidūrė, buvo tepalo valdymas grunto kolektoriuje. Po šių tyrimų atsirado ir daugiau pastangų iširti šio tipo šilumos siurblius (Freundo, Whitlovo, 1959, Goulburno, Fearono, 1978, Goulburno, Fearono, 1983).

2009 metais Wangas et al. atliko DX šilumos siurblio tyrimus su R134a šaldymo agentu šildymo režimu. Sistema buvo sudaryta iš trijų 30 metrų gylio vertikalinių gręžinių ir buvo stebimas darbas 20 žiemos dienų. Pagal gautus rezultatus nustatyti $COP_{hp} = 3,55$ ir $COP_{sys} = 2,28$, vidutinis šildymo galingumas gautas 6,43 kW. Šiame darbe pabrėžta, kad buvo problemų su šaldymo agento netolygiu pasiskirstymu tarp gręžinių. 2013 metais tas pats mokslininkas atliko tuos pačius tyrimus su keturiais 20 metrų gręžiniais, siekdamas pagerinti tepalo grįžimą į kompresorių. 2014 metais Fannou et al. atliko tuos pačius tyrimus kaip ir Wangas et al. su trimis 30 metrų gylio gręžiniais, tačiau su R22 šaldymo agentu. Jie abu padarė tas pačias išvadas, kad reikia toliau tirti garintuvo matmenis norint sumažinti slėgio nuostolius garintuve, siekiant rasti optimaliausią variantą tarp mažų slėgio nuostolių, tepalo grįžimo ir šaldymo agento kiekio sistemoje. 2011 metais Halošanas pristatė studiją apie gruntinių šilumos siurblių komercializavimą ir problemas, stabdančias šios technologijos plitimą. Jis pabrėžė DX sistemų projektavimo metodų trūkumą, kaip vieną didžiausių problemų, su kuriomis susiduria ši technologija.

2015 metais Kanadoje buvo atlikta kelių tokio tipo šilumos siurblių modeliavimo ir rezultatų analizė, norint užpildyti trūkstamą informaciją apie DX sistemas. Buvo iširtas siurblio veikimas šildymo režimu. Išmatuotas masinis šaldymo agento debitas, apskaičiuotas optimalus gręžinio ilgis ir pasvirimo kampas, atsižvelgiant į šilumos srautą, esantį grunte. Tyrime pateikiamas skaičiavimo modelis, kuriame aprašoma R22 šaldymo agento fazių kaita, šilumokaita tarp vamzdžių ir skiedinio, tarp skiedinio ir grunto.

Modelis lyginamas su eksperimentiniu šilumos siurbliu, esančiu Monrealyje, kai dirba tik vienas gręžinys. Pats gręžinys yra 30 metrų gylio, bet vamzdynas, einantis nuo siurblio iki gręžinio, yra neizoliuotas, taigi pridedama 10 metrų šaldymo agento šilumokaitai. Eksperimente gauti šie matmenys: slėgis ir temperatūra prieš išplėtimo vožtuvą, masės srautas kompresoriaus išėjime ir vamzdžio temperatūros penkiuose skirtingose garintuvo pozicijose:

- $z = 10$ m mažėjančiame sraute;
- $z = 34$ m mažėjančiame sraute;
- $z = 40$ m kilpos lenkimosi taške;

- $z = 34$ m didėjančiame sraute;
- $z = 10$ m didėjančiame sraute.



4.5 pav. Fazių kaita garintuve

Entalpija skaičiuota su vamzdžio slėgiu ir temperatūra, minus vienas laipsnis prieš vožtuvą. Šis temperatūros pataisymas yra skirtumas tarp vamzdžio temperatūros, kuri yra matuojama ir pačio R22 šaldymo agento temperatūros, kurią naudojo entalpijai rasti.

Kai $z = 0$:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_i;$$

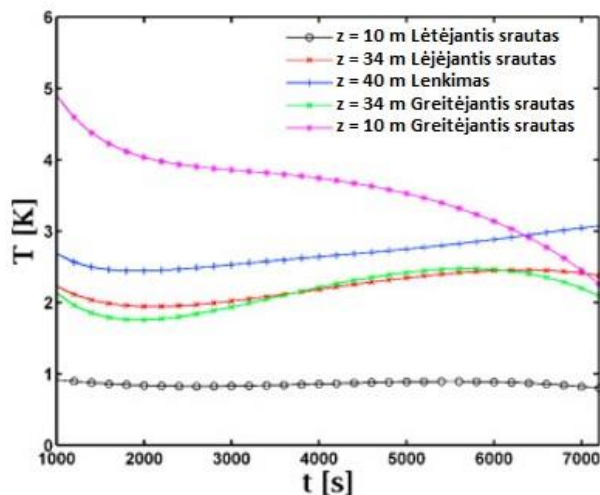
$$h_m = h_i;$$

Ta pati sąlyga buvo pritaikyta visiems z , kai $t = 0$.

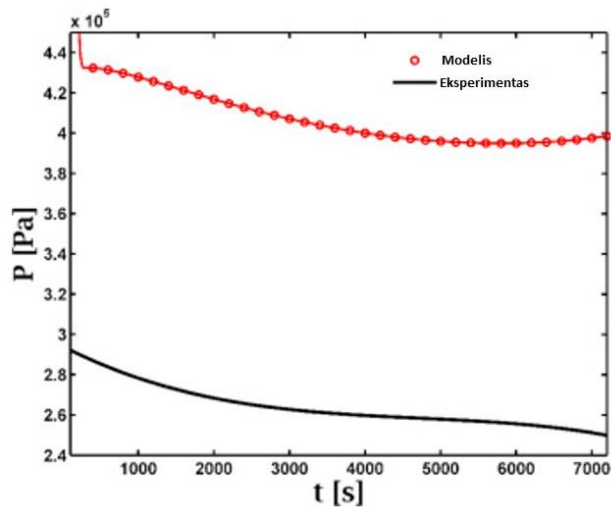
Eksperimente slėgis įėjime nebuvo matuojamas, tačiau vamzdžio temperatūra taške $z = 10$ m, su hipoteze, kad šaldymo agentas yra sotusis mišinys, galima apskaičiuoti slėgį. Slėgio kritimas vamzdžiuose skaičiuojamas su Müllerio-Steinhageno ir Hecko koreliacijomis. Slėgio kritimas lenkimo vietoje skaičiuojamas su Domanskio koreliacija.

Norėdami patvirtinti modelio tikslumą, jie palygino simuliacijos ir eksperimentų metu gautus penkių skirtingų taškų rezultatus. Taip pat sulyginavo entalpiją ir slėgį išėjimo taške. Net ir kai veikė tik vienas gręžinys, nedidelė srauto dalis pateko ir į kitus gręžinius, dėl to srautas sumažėjo 20 %.

Visuose gautuose modeliavimo ir tyrimų rezultatų grafikuose matomas toks pat temperatūrų kitimo dėsningumas. 4.6 pav. parodytas modelio temperatūros rezultatų išsidėstymas laiko atžvilgiu.



4.6 pav. Temperatūros kitimas garintuvo taškuose laiko atžvilgiu



4.7 pav. Slėgio kitimas garintuvo išėjime

4.7 pav. parodytas slėgis šilumokaičio išėjime. Šiuo atveju eksperimentinis slėgis buvo matuojamas kompresoriaus pasiurbime. Tai iš dalies paaiškina 150 kPa skirtumą tarp gautų modeliavimo ir eksperimento rezultatų. Taip pat tikėtina, kad modeliavime gauti slėgio nuostoliai garintuve buvo per maži.

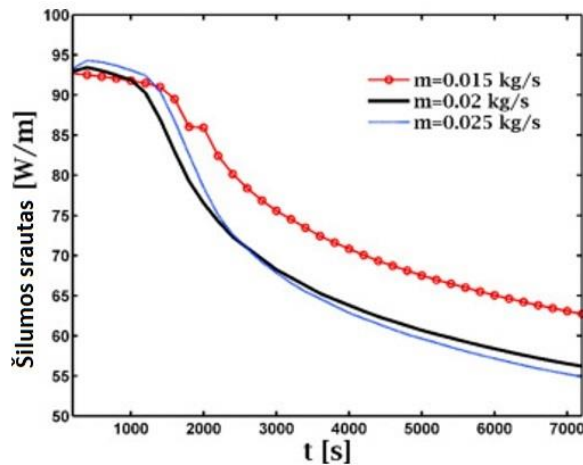
Entalpijos, esančios šilumokaičio išėjime modeliavimo ir eksperimento rezultatų skirtumai pastebimai mažesni ir vidutinė gaunama reikšmė buvo apie 4,04 J/kg.

Perkaitimo vertė garintuve skaičiuota su entalpija ir slėgiais, gautais anksčiau. Simuliacijoje gautos reikšmės svyravo tarp 4,5 °C ir 10,5 °C, kai eksperimento metu gautas perkaitimas svyravo tarp 8 °C ir 10 °C.

Po šio modeliavimo tikslumo patvirtinimo, buvo atlikti parametrų tyrimai norint nustatyti įvairių parametrų įtaką šilumokaitai garintuve.

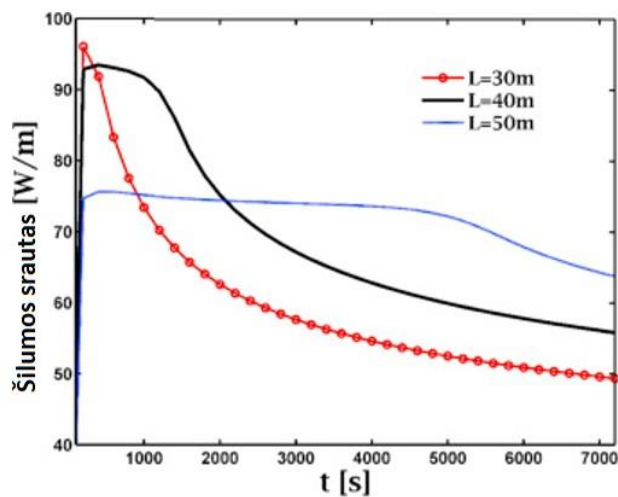
4.8 pav. Parodyta šilumos apykaita tekant trims skirtingiems šaldymo agento masiniams debitams garintuvo pradžioje. Testo pradžioje šilumos srautas didesnis su didžiausiu masiniu debitu ($m = 0.025$ kg/s), bet po 2000 sekundžių įvyksta pasikeitimas. Tai gali būti paaiškinta tuo faktu, kad tekant dideliame masiniame debite greičiau atšąla grunto temperatūra. Todėl daroma išvada, kad siekiant geresnio šilumos siurblio efektyvumo, rekomenduojama turėti kelis gręžinius su mažesniu masiniu debitu, negu vieną su dideliu.

Iš 4.9 pav. matoma, kad trumpame laiko periode, trumpiausias (30 m) gręžinys turi geriausią šilumos perdavimo efektyvumą vienam metrui. Taip yra dėl to, kad šaldymo agento faziniai virsmai vyksta beveik per visą garintuvo ilgį, o šilumos srautas yra didesnis dvifaziame sraute nei vienfaziam. Pavyzdžiui 1000 s. taške fazių kaita vyksta 100% garintuvo ilgio, kai jo ilgis 30 metrų, 90%, kai ilgis 40 metrų ir tik 60%, kai kolektoriaus ilgis 50 metrų.



4.8 pav. Šilumos srauto kitimas garintuve su skirtingais masiniais debitais

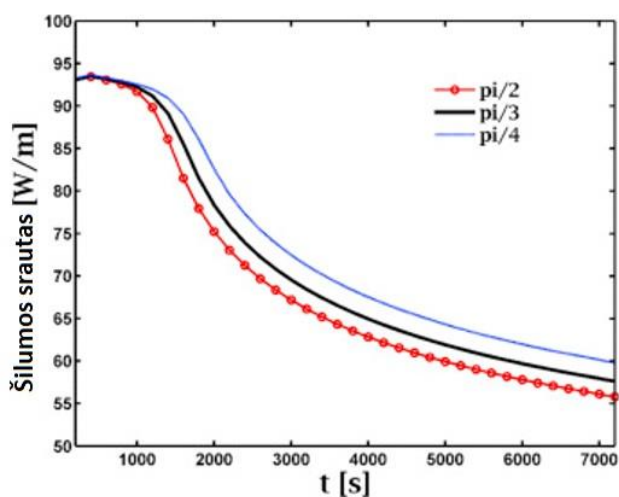
Šis šilumos srautas po trumpo laiko tarpo pradeda greitai kristi, kai garintuvo ilgis yra 30 metrų. Tas pats atsitinka ir 40 m, bei 50 m ilgio kolektoriams, tačiau vėliau. Testo metu grunto temperatūra krito ir tai, savaime aišku, mažino šilumokaitą tarp R22 šaldymo agento ir grunto. Ši šilumokaita vyksta dviem etapais: fazių kaita su dideliu šilumos perdavimo koeficientu ($3000-5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) ir perkaitimas su mažu šilumos perdavimo koeficientu ($100-350 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Testo pradžioje perkaitimas sumažėjo ir vidutinis šilumos srautas per metrą daug nepakito, bet kai perkaitimas išnyksta, tada šilumos srautas per metrą pradeda sparčiai kristi dėl to, kad fazių kaita mažėja. Todėl norint užtikrinti pastovų aukštą šilumos srautą per metrą, reikalingas bent minimalus perkaitimas.



4.9 pav. Šilumos srauto kitimas su skirtingais garintuvų ilgiais

4.10 pav. rodo, kad gręžinio orientavimas turi tiesioginį poveikį šilumos srautui šilumokaityje. Galima šilumokaitą padidinti 7 % pakeičiant gręžinio kampą nuo $\pi/2$ iki $\pi/4$ (lyginant su horizontaliu). Tai galima paaiškinti faktu, kad slėgio nuostoliai padidėja 10 %, kai kampas sumažėja. Jeigu slėgis sraute yra mažesnis, temperatūrų skirtumas tarp grunto ir srauto yra didesnis ir šilumos srautas didėja. Tačiau šis slėgio kritimo padidėjimas taip pat padidina kompresoriaus darbą ir taip

sumažina pačio šilumos siurblio efektyvumą. Taip pat, jeigu kampas per didelis, gali padidėti įrengimo išlaidos ir įtaka aplinkai.



4.10 pav. Šilumos srauto kitimas garintuve su skirtingais orientavimais grunte

Parametrinė analizė įrodo, kad norint gauti geresnę šilumokaitą, garintuvui reikalingas optimalus ilgis, pasvirimo kampas ir mažas masinis debitas.

Literatūros apžvalga atskleidė, kad yra mokslinių tyrimų trūkumas apie tiesioginio išgarinimo geotermines sistemas. Norint skatinti šios technologijos plėtimąsi reikia atlikti daugiau geoterminių šilumos siurblių modeliavimų. Modelį galima tobulinti į skaičiavimus prijungiant ir kitas šilumos siurblio dalis, kaip kondensatorius ir kompresorius. Gavus pilnos sistemos modelį galima tobulinti DX sistemų garintuvo dizainą. [20]

5. Šilumos siurblys su dviem garintuvais

5.1. Tyrimo objektas

Gyvenamajame 76 m² šildomo ploto name yra sumontuotas 7 kW šildymo pajėgumo oras – vanduo šilumos siurblys. Tyrimo tikslas – pridėti prie esamo šilumos siurblio papildomą tiesioginio išgarinimo šilumokaitį, kuris sumontuotas grunte, žemiau įšalo ribos, ir dirba esant šaltomis žiemos dienomis. Sekti šios naujos sistemos darbą ir įvertinti gautą efektyvumą, energijos sąnaudas bei pateikti išvadas. Nustatyti ar nauja sistema dirba efektyviau nei standartinis oras – vanduo šilumos siurblys. Garintuvai atskiriami solenoidiniais vožtuvais, kurie valdomi pagal oro temperatūrą.

5.2. Garintuvo parinkimas

Kadangi papildomas tiesioginio išgarinimo kolektorius integruojamas į jau dirbančią sistemą, garintuvas renkamas pagal kompresoriui reikalingą garintuvo galią. Sistemoje pastatytas 1,27 kW vartojamosios galios spiralinis kompresorius. Pagal šiuos duomenis programoje „Coolpack“ randame reikalingą garintuvo galią. Naudojamas aukštų kondensacijos temperatūrų (55 °C) ciklas, kadangi šilumos siurblys pats ruošia ir karštą vandenį be papildomo kaitinimo elemento pagalbos. Kadangi grunte žiemos metu laikosi +5 - +10 °C temperatūra, skaičiavimui priimama 0 °C garavimo temperatūra. Perkaitimas 5 °C, peraušinimas 2 °C. Skaičiavimas programoje pateiktas 3 priede. Matoma, kad reikalingas 5 kW galios garintuvas. Atsižvelgiant į tai, kad tai tik teoriniai paskaičiavimai, garintuvo galia parenkama su 1 kW atsarga: $Q_e = 6 \text{ kW}$.

5.1 lentelė. Garintuvo skaičiavimo rezultatai

Garintuvo galia, kW	Kondensatoriaus galia, kW	Darbo agento masinis debitas, kg/s	Darbo agento tūrinis debitas, m ³ /h	Kompresoriaus vartojama galia, kW
5,075	6,345	0,034	6,67	1,27

Kadangi tokių sistemų labai nedaug, tad jau pagamintų tokių garintuvų nėra. Gaminamas savadarbis garintuvas. Darbo agentų ciklo analizės programoje „Solkane“ suvedamas toks pat ciklas ir randamas kompresoriaus pasiurbimo rekomenduojamas vamzdžio diametras (4 priedas) $d_{suc} = 15,21 \text{ mm}$. Kadangi tokio diametro vamzdžiai nėra gaminami, parenkamas sekantis artimiausias didesnis diametras $d_{suc} = 16 \text{ mm}$. Tai yra sotaus garo vamzdis, kadangi į garintuvą patenka skystos būsenos darbo agentas ir atsižvelgiant į tai, kad garavimo metu darbo agento tūris didėja, garintuvo pradžioje ir pabaigoje turi būti skirtingo diametro vamzdis. Elektroninis išplėtimo vožtuvas purškia į 6 mm vidinio diametro vamzdį, kuris nueina į tokio pat diametro garintuvo pradžią. Šioje vietoje garintuvas išsišakoja į 4 atskiras spirales, po kurių į kompresorių eina jau 16 mm patraukimo vamzdis. Visam garintuvui naudojamas 0,8 mm sienelės storio varinis vamzdis.

5.3. Garintuvo sistema

Pradžioje buvo svarstyti keli tiesioginio išgarinimo garintuvo variantai:

- Guldyti kolektorių horizontaliai grunte, apie 2 metrų gylyje;
- Nuvesti iki netoliese esančio upelio;
- Gręžti vertikalų gręžinį.

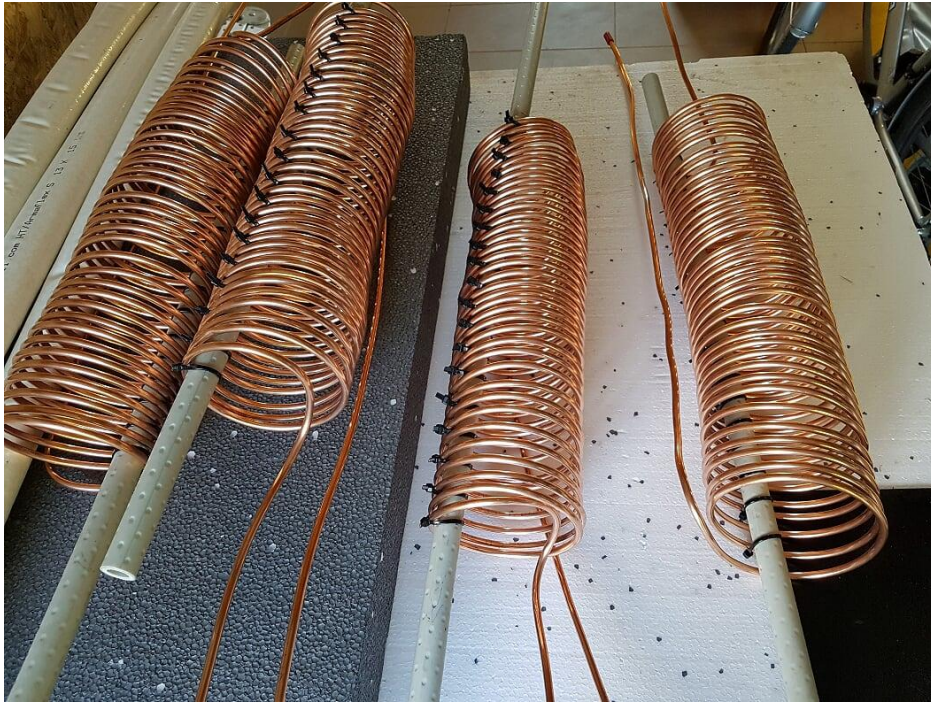
Nuspręsta daryti hibridinį - eksperimentinį variantą – 1,5 m gylyje užkasti 1000 litrų talpą, kurioje sukauptas upelio vanduo, o į talpą įleistas garintuvas 4 spiralių formoje. Talpos viršus izoliuotas ~50 cm putplasčio sluoksniu, šonai ir dugnas neizoliuotas, tam, kad talpa priimtu grunte esančią šilumą. Talpoje yra įleisti du temperatūros davikliai: vienas talpos viršuje, kitas prie dugno. Kai temperatūra prie apatinio daviklio nukrenta iki 1 °C, siekiant išvengti užšalimo, įsijungia papildomas pumpavimo siurblys, kuris pakeičia talpoje esantį atšalusį vandenį į šiltesnį upelio vandenį (žiemos metu laikosi 3-4 °C). Tuo metu, kol vyksta talpos atšildymas, šilumos siurblys persijungia į standartinį oras – vanduo šilumos siurblio veikimą.

5.2 lentelė. Aqua Nova NCM-10000 siurblio techniniai parametrai [21]

Vandens debitas	10000 l/h
Galia	75 W
Kėlimo aukštis	5 m
Išmatavimai	275×170×135mm
Išleidimo angos skersmuo	32 mm
Patraukimo skersmuo	32 mm
Maitinimas	230 V, 50 Hz

5.3 lentelė. Eksperimentinio šilumos siurblio techniniai parametrai

B0/W35	
Šildymo pajėgumas	6 kW
COP	3,65
B0/W50	
Šildymo pajėgumas	4,7 kW
COP	2,71
Energijos tiekimas	3~F/380-400V/50Hz
Naudojama srovė	9,8 A
Paleidimo srovė (blokuoto rotorius)	18 A
Darbinis agentas	R407C
Min. darbinis slėgis	0,5 bar
Maks. darbinis slėgis	30 bar
Kompresorius	Spiralinis
Kondensatorius	Plokštelinis
Garintuvas	Tiesioginio išgarinimo
Darbinio agento purškimo vožtuvas	Elektroninis
Triukšmingumas	37 db(A)
Maks. šildymo temperatūra	55 °C
Išmatavimai	800x400x600 mm
Svoris	76 kg



5.1 pav. Garintuvo spiralės



5.2 pav. Talpos montavimo darbai

Šilumos siurblio schemas su šiuo garintuvu pateiktos 5 ir 6 prieduose.

5.4. Termodinaminiai skaičiavimai

Sumontuotoje ir paliktoje talpoje po kelių dienų nusistovėjo 8 °C vandens temperatūra. Kiek šilumos bus nuvesta nuo 1000 litrų vandens, jį atšaldant nuo 8 °C iki 1 °C, apskaičiuojama pasinaudojant formule:

$$Q_{atš} = c_v m \Delta t \quad (6)$$

čia $Q_{atš}$ – vandens, esančio talpoje atiduota šiluma, kJ; c_v – vandens savitoji šiluma, 4200 J/kg·°C; m – vandens masė, kg; Δt – pradinės ir galutinės temperatūrų skirtumas.

$$Q_{atš} = 4,2 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} \right) \cdot 1000 \text{ l} \cdot (8 ^\circ\text{C} - 1 ^\circ\text{C}) = 29400 \text{ kJ} = 29,4 \text{ MJ}$$

Iš ciklo analizės programoje „Coolpack“ randame, kad garavimo metu priimama: $Q_e = 148,254 \text{ kJ/kg}$ šilumos energijos. Ciklui per sekundę reikalingas masinis debitas $m_c = 0.03423393 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 123,24 \text{ kg/h}$. Kondensatoriuje atiduodama šiluma $Q_c = 185,35 \text{ kJ/kg}$. (3 priedas). Per valandą reikalingas garavimui šilumos kiekis skaičiuojamas su 7 formule:

$$Q_{c/h} = Q_e \cdot m_c \quad (7)$$

$$Q_{c/h} = 148,254 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 123,24 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 18271 \text{ kJ/h};$$

Taigi sistemai veikiant tokiu ciklu garintuvas talpą atšaldys per (8 formulė):

$$T_{atš} = \frac{Q_{atš}}{Q_{c/h}} \quad (8)$$

$$T_{atš} = \frac{29400 \text{ kJ}}{18271 \text{ kJ/h}} = 1,61 \text{ h}$$

Per tą laiką bus pagaminta šilumos:

$$Q_{pag} = Q_c m_c T_{atš} \quad (9)$$

čia Q_c – kondensatoriaus entalpija, kJ/kg.

$$Q_{pag} = 185,35 \cdot 123,24 \cdot 1,61 = 36774,5 \text{ kJ};$$

Tiek šilumos pakanka pakelti 300 litrų boilerio temperatūrą:

$$\Delta t = \frac{Q_{pag}}{c_v m} \quad (10)$$

$$\Delta t_b = \frac{36774,5 \text{ kJ}}{4,2 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} \right) \cdot 300 \text{ l}} = 29,2 ^\circ\text{C}$$

Kadangi gyvenamosiose namuose šilumos siurblio sistemos dažniausiai dirba 5-10 °C intervalais. Pasiekęs reikiamą temperatūrą šilumos siurblys išsijungs, ir per laiką, kurį jis nedirba, talpoje esantis vanduo natūraliai šiek tiek vėl pašils dėl grunte esančios šilumos. Esant reikalui įsijungs papildomas

siurblys, kuris pakeis atšalusį vandenį šiltesniu upelio vandeniu. Jo techniniai parametrai pateikti 5.2 lentelėje.

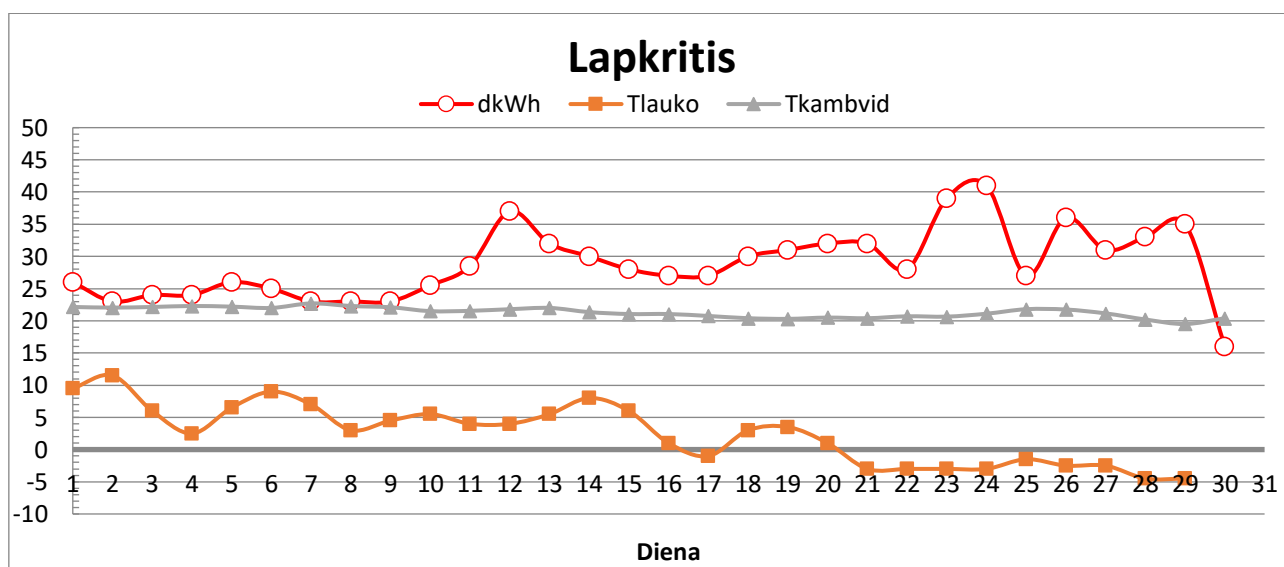
5.5. Tyrimo rezultatai

2018 metų lapkričio – gruodžio ir 2019 metų sausio – vasario mėnesiais buvo stebimos šios eksperimentinės sistemos energijos sąnaudos. Rezultatų grafikai pateikti 5.4 – 5.7 paveikslėliuose. Grafikuose pateikta kiekvienos dienos lauko oro temperatūra, kambariuose esanti temperatūra ir per parą suvartojamas elektros energijos kiekis. 7 priede pateiktos detalios lentelės su visais surinktais darbo duomenimis. Pagal būtent tam namui, kuriame buvo atliktas tyrimas elektros kainą (0,114 €) paskaičiuota kiek per mėnesį kainuoja šildymas ir karšto vandens ruošimas su šia sistema (5.4 lentelė).

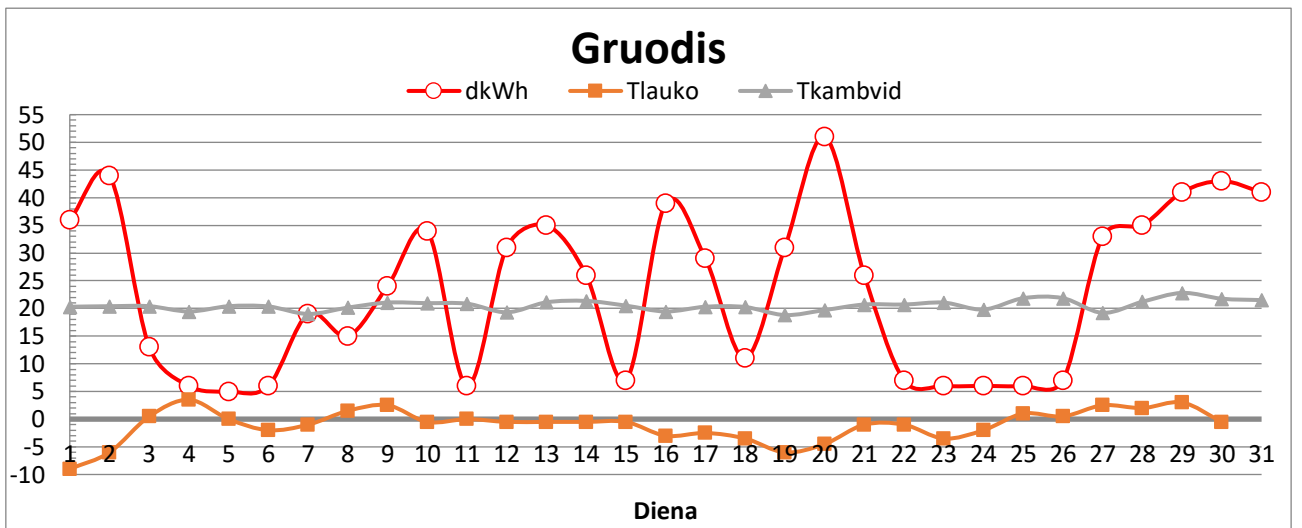
Pagal gautus rezultatus matoma, kad sistema dirba neefektyviai, energijos sąnaudos ir šildymo išlaidos per didelės. Šilumos siurblio darbo metu pastebėta, kad garavimo temperatūra yra ypatingai žema, ko pasekoje vandens talpa, esanti grunte, labai greitai užšąlo. Papildomas pumpavimo siurblys nesugebėjo pakankamai greitai pakeisti vandens, esančio talpoje, kad jis neužšaltų. Pasikonsultavus su universiteto profesoriumi nuspręsta, kad garintuvo vamzdžio diametras yra per mažas, o pumpavimo siurblys per silpnas. Galima išeiti perdarinti sistemą ir garintuvo rites pakeisti į 10 mm vidinio diametro vamzdžius, o siurblių pakeisti į bent 200 W vartojamosios galios.

5.4 lentelė: Eksperimentinės sistemos mėnesinės šildymo išlaidos, Eur

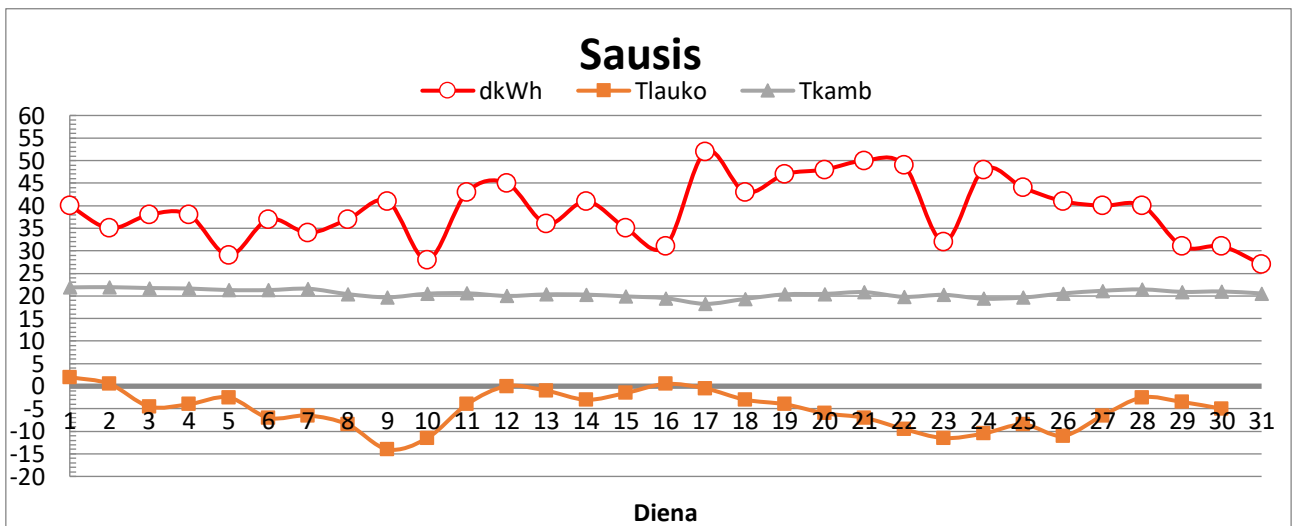
Lapkritis	Gruodis	Sausis	Vasaris
98,38	81,97	138,05	105,79



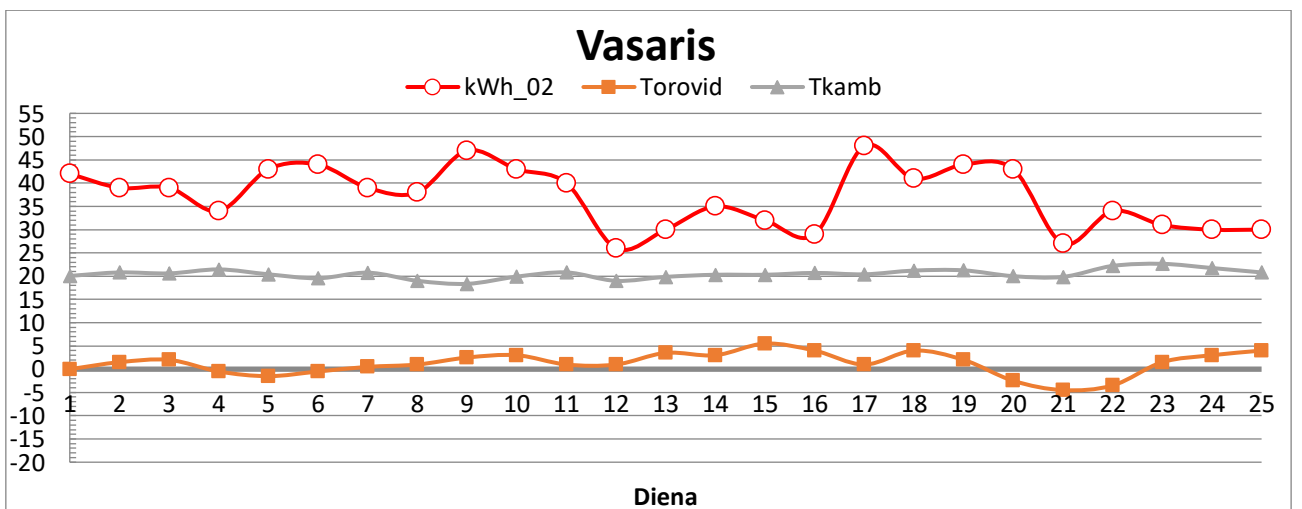
5.3 pav. Lapkričio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai



5.4 pav. Gruodžio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai



5.5 pav. Sausio mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai



5.6 pav. Vasario mėnesio eksperimentinės sistemos darbo rodikliai

Svarstomas ir kitas variantas – nutiesti varinius tiesioginio išgarinimo vamzdžius iki pat šalia namo esančio šlaito apačios, kur teka žiemos metu neužšalantis upelis. Tokios sistemos schemos pateiktos 8 ir 9 prieduose. Skaičiuojamas reikalingas tokios sistemos kompresoriaus pasitraukimo vamzdžio diametras. Naudojami karšto vandens ruošimo parametrai. Naudojamas ciklas: garavimo temperatūra -5 °C, kondensacija 55 °C, perkaitimas 5 °C, peraušinimo nėra, o isentropinis efektyvumas 0,8. Skaičiavimai pateikti 10 priede. Iš skaičiavimų matoma, kad tokiam ciklui reikalingas 22 mm vidinio diametro kompresoriaus pasitraukimo vamzdis. Kadangi iki garintuvo eina skystos fazės darbo agentas, pirmajai šilumokaičio daliai naudojamas 18 mm vidinio diametro vamzdis. Vamzdžiai klojami 1,5 m gylyje, nuleidžiami šlaitu iki šalia esančio upelio. Upelyje garintuvas išvedžiojamas gyvatuku ir grįžta atgal į šilumos siurblių. Kadangi upelis neužšalantis ir žiemos metu, o tekantis srautas gan stiprus, tikėtina, kad šilumos srauto atsinaujinimo garintuvui užteks.

Skaičiuojamas reikalingas naujo garintuvo paviršiaus plotas. Jis skaičiuojamas pasinaudojant 11 formule.

$$F = \frac{Q_e}{k \cdot \Delta t_{vid.log.}} \quad (11)$$

čia F – šilumokaičio plotas, m²; Q_e – garintuvo galia, W; k – šilumos perdavimo koeficientas, W/m²·K (vandens 1000 W/m²·K); $\Delta t_{vid.log.}$ – vidutinė logaritminė temperatūrų kitimų šilumokaičio galuose reikšmė, °C.

$$\Delta t_{vid.log.} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (12)$$

čia Δt_1 – šilumnešio, garinančio darbo agentą temperatūrų skirtumas garintuvo pradžioje ir išėjime, °C; Δt_2 – darbo agento temperatūrų skirtumas garintuvo pradžioje ir išėjime, °C.

Skaičiuojant garintuvo plotą priimama, kad vandens temperatūra upelyje yra 3 °C. Įvertinus R407C agento temperatūros kitimą fazių kaitos metu ir reikalingą perkaitimą sotaus garo užtikrinimui, skaičiavimams priimama, kad garintuvo pradžioje darbo agento temperatūra yra -4 °C, o išėjime +3 °C. Vandens temperatūra pradžioje +3 °C, o pratekėjus per garintuvą, lieka +1 °C.

$$\Delta t_{vid.log.} = \frac{(3 \text{ } ^\circ\text{C} - 1 \text{ } ^\circ\text{C}) - (-4 \text{ } ^\circ\text{C} - 3 \text{ } ^\circ\text{C})}{\ln \frac{(3 \text{ } ^\circ\text{C} - 1 \text{ } ^\circ\text{C})}{(-4 \text{ } ^\circ\text{C} - 3 \text{ } ^\circ\text{C})}} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$F = \frac{5000 \text{ W}}{1000 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \right) \cdot 4 \text{ } ^\circ\text{C}} = 1,25 \text{ m}^2$$

Pagal šiuos gautus rezultatus galima pasinaudoti 13 formule ir apskaičiuoti kiek reikia varinio vamzdžio, norint gauti tokį šilumokaičio plotą. Naujam garintuvui bus naudojamas 22 mm išorinio diametro varinis vamzdis.

$$L = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (13)$$

čia L – vamzdžio ilgis, m; r – vamzdžio skersmuo, m.

$$L = \frac{1,25 \text{ m}^2}{2 \cdot \pi \cdot 0,011 \text{ m}} = 18,08 \text{ m}$$

Skaičiavimuose imtas 5 kW galingumo garintuvas, vietoje darbo pradžioje paskaičiuoto 6 kW. Taip priimta dėl to, kad šiuose skaičiavimuose neįvertintas vamzdžio ilgis, kuris nutiesiamas grunte iki upelio. Tai šiek tiek padidina šilumos mainus ir gaunasi kaip garintuvo galios atsarga.

Išvados

1. Šilumos siurblių, naudojamų buitiniuose statiniuose, palyginamoji analizė atskleidė, kad aeroterminio šilumos siurblio įsirengimo sąnaudos 31,4 % mažesnės, tačiau metinės šildymo sąnaudos 9,45 % didesnės nei geoterminio šilumos siurblio.
2. Šaldymo agentas - tai substancija arba mišinys, naudojama kompresorinėse šaldymo arba šildymo sistemose, kuri nuolat keičia agregatines būsenas – iš skystos į dujinę ir atvirkščiai. Pradėtas naudoti 20 – tajame amžiuje užkariavo šaldymo įrangos rinką. Literatūros analizės metu nustatyta, kad svarbiausios šaldymo agento savybės yra virimo temperatūra, užšalimo taškas, garavimo ir kondensavimosi slėgiai, kritinė temperatūra ir latentinė šiluma.
3. Literatūros apžvalga atskleidė, kad yra mokslinių tyrimų trūkumas apie tiesioginio išgarinimo geotermines sistemas. Norint skatinti šios technologijos plėtimąsi reikia atlikti daugiau geoterminių šilumos siurblių modeliavimų. Modelį galima tobulinti į skaičiavimus prijungiant ir kitas šilumos siurblio dalis, kaip kondensatorius ir kompresorius. Gavus pilnos sistemos modelį galima tobulinti DX sistemų garintuvo dizainą.
4. Suprojektuota ir paleista darbui eksperimentinė sistema, kuri kaip šilumos šaltinį naudojo netoliese esančio upelio vandenį, papildydama siurblio pagalba 1000 litrų talpą, kurioje šiluma atiduodama garintuvui. Surinkta 4 mėnesių tyrimo informacija apie sistemos darbą, atlikta duomenų analizė.
5. Talpoje sumontuoto garintuvo darbo režimų rezultatai rodo, kad sistema dirba neefektyviai, suvartoja daug elektros energijos. Tyrimais nustatyta, kad vandens apykaita talpoje nepakankama ir greitai atšalęs vanduo suformuoja ledo sluoksnį ant garintuvo, kuris blogina šilumos mainus, ko pasekoje garintuvo galingumas mažėja ir tuo pačiu garavimo temperatūra mažėja. Taip pat nustatyta, kad suprojektuotas ir pagamintas garintuvas yra per mažo ploto, per mažos galios.
6. Įvertinus rezultatus ir atlikus problemų analizę galima konstatuoti, kad sistema netinkamos galios ir reikalinga rekonstrukcija. Alternatyvi sistema galėtų būti, kai garintuvas nutiesiamas iki šalia esančio upelio, parenkamas didesnio diametro garintuvas. Atlikus skaičiavimus nustatyta, tokiai sistemai reikalingas 1,25 m² ploto šilumokaitis. Priimta naudoti 22 mm išorinio diametro vamzdį, paskaičiuota, kad reikalinga pakloti 18 metrų šio vamzdžio.

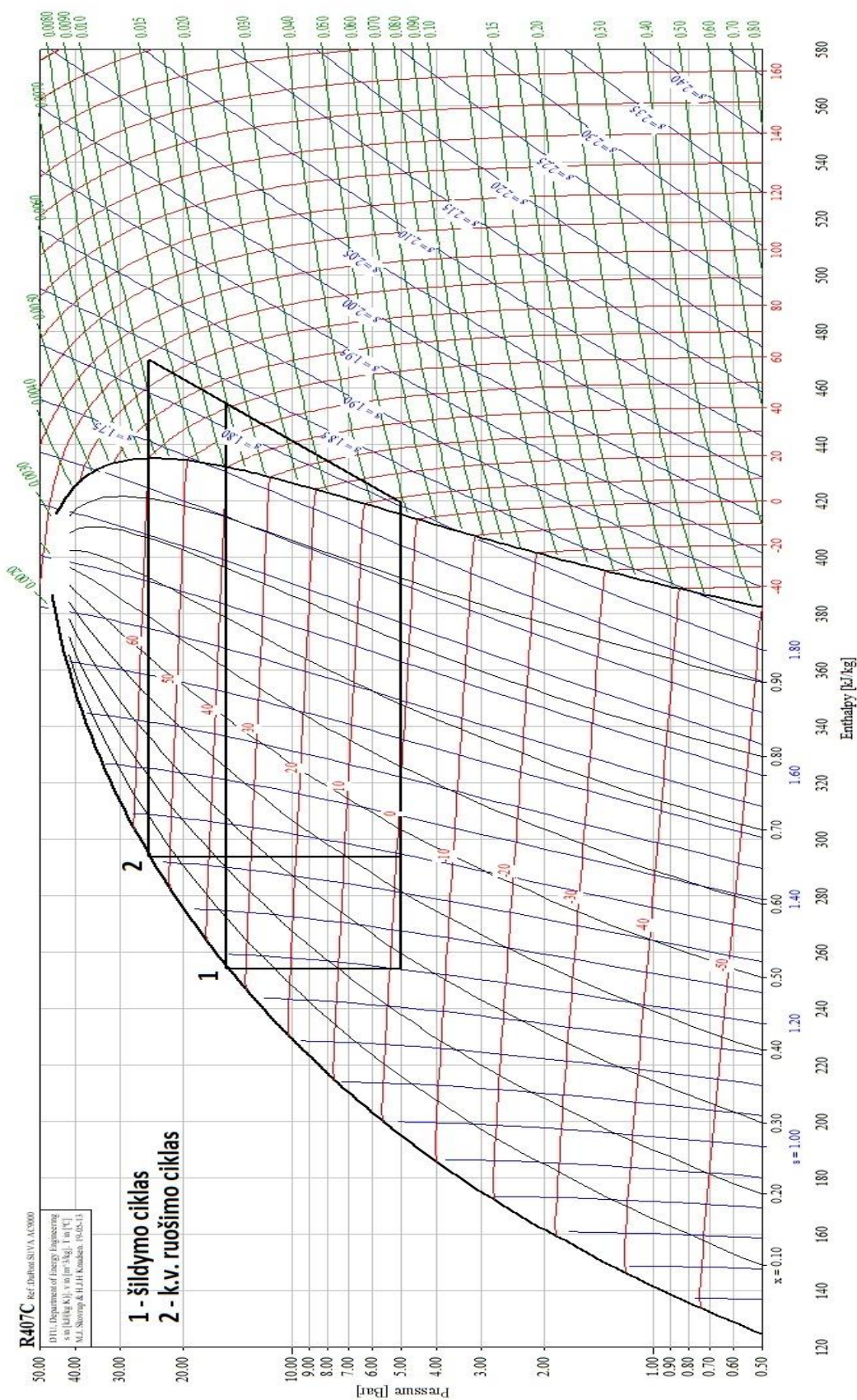
Literatūros sąrašas

1. Šilumos siurblio veikimo principas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-04-28]. Prieiga per: <https://silumossiurblys.weebly.com/>
2. Wikipedia: Absorption heat pump [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-03-16]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_heat_pump
3. Holiday weather: Vilnius, Lithuania: Annual Weather Averages [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-17]. Prieiga per: <https://www.holiday-weather.com/vilnius/averages/>
4. VKEKK: Visuomeniniai elektros energijos tarifai buitiniams vartotojams 2018–2019 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-02-17]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2018-metai/2018-lapkritis/2018-11-30/komisija-patvirtino-2019-m-elektros-energijos-tarifus-buitiniams-vartotojams.aspx>
5. Wikipedia: Refrigerant [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-03-16]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerant>
6. Bitzer Refrigerants 19 leidinys [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2017-05-03]. Prieiga per: https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-501-19.pdf
7. Šaldymo agentų temperatūros priklausomybė nuo slėgio [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-23]. Prieiga internete: https://www.engineeringtoolbox.com/refrigerant-temperature-pressure-chart-d_1683.html
8. MarinerDesk: Refrigerant [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-23]. Prieiga per: <https://www.marinerdesk.com/refrigerant/>
9. Wikipedia: R407C refrigerant [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/R-407C>
10. Refrigerants: R407C technical data [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: http://www.refrigerants.com/pdf/R407C_LINK.pdf
11. Wikipedia: R410A refrigerant [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/R-410A>
12. Refrigerants: R410A technical data [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: http://www.refrigerants.com/pdf/R410A_LINK.pdf
13. Wikipedia: Chlorodifluoromethane [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorodifluoromethane>
14. Refrigerants: R22 technical data [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: http://www.refrigerants.com/pdf/R22_LINK.pdf
15. Wikipedia: Tetrafluoroethane [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/1,1,1,2-Tetrafluoroethane>
16. Refrigerants: R134a technical data [interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-10-28]. Prieiga per: http://www.refrigerants.com/pdf/R134A_LINK.pdf
17. Tiesioginio išgarinimo kolektorius [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-19]. Prieiga per: <http://nmdgreen.com/nmd-showcase/projects-for-home-owners/nmd-lab-geothermal-system/>
18. Issues with DX systems [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: <https://www.achrnews.com/articles/91004-selecting-installing-oil-separators>
19. Aukojamasis anodas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: <https://www.cheaphotwater.com.au/hot-water-heater-anode-replacement/>

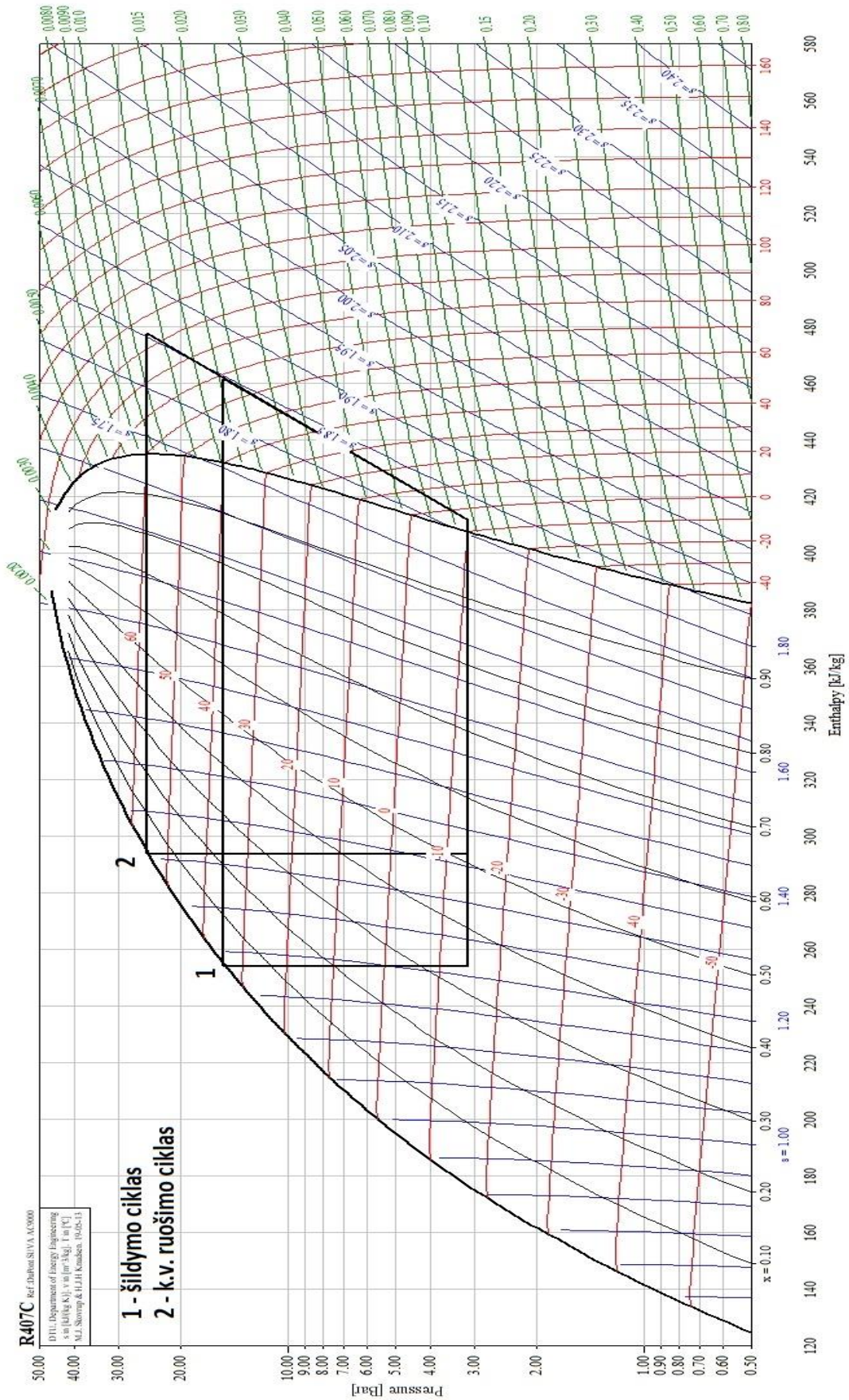
20. Clément, Rousseau, Jean-Louis, Comlan Fannoua, LouisLamarchea, MohamedOuzzaneb, StanislawKajla. Geothermics [interaktyvus]. Montréal, 2015, volume 57, pages 95-103 [žiūrėta 2018-04-16]. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0375650515000735?via%3Dihub>
21. Siurblio techniniai parametrai [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: <https://zoo-aquos.pl/pl/p/Pompa-Do-Oczka-Wodnego-Kaskady-AQUA-NOVA-NCM-10000-75W-10000LH-5m-/3799>

Priedai

1 priedas. Geoterminio šilumos siurblio šildymo ir karšto vandens ruošimo ciklai su R407C darbo agentu.



2 priedas. Aeroterminio šilumos siurblio šildymo ir karšto vandens ruošimo ciklai su R407C darbo agentu.



3 priedas. Pirmojo garintuvo galios skaičiavimas „Coolpack“ programoje

Cycle info [One stage]. Refrigerant: R407C

Select cycle number:

(1)

Delete cycle

Values:

Evaporating temperature [°C]:	0.00	Condensing temperature [°C]:	50.00
Superheat [K]:	5.00	Subcooling [K]:	2.00
Dp evaporator [bar]:	0.00	Dp condenser [bar]:	0.00
Dp suction line [bar]:	0.00	Dp liquid line [bar]:	0.00
Dp discharge line [bar]:	0.00		
Isentropic efficiency [0-1]:	1.00		

Calculated:

Qe [kJ/kg]:	148.254
Qc [kJ/kg]:	185.352
COP:	4.00
W [kJ/kg]:	37.098
Pressure ratio [-]:	4.335

Dimensioning:

Qe [kW]:	5.075
Qc [kW]:	6.345
m [kg/s]:	0.03423393
V [m ³ /h]:	6.6665
W [kW]:	1.270
Q loss [kW]:	0.000

Volumetric efficiency

n_vol: 0.00

Displacement [m³/h]: 0

OK Coordinates of points... Print Copy Update Help

4 priedas. Pirmojo garintuvo skaičiavimas „Solkane“ programoje.

R22 R23 R32 R123 R124 R125 R134a R143a R152a R227 R365mfc R404A R407A R407C R409A R410A R507 SES36 S22L S22M R11 R12

R502 R13B1 ?

SOLKANE® 407C

t_c 86.03 °C
P_c 46.30 bar
v_c 2.065 dm³/kg

Properties

Evaporator
Temperature 0.00 °C
Superheating 5.00 K
Pressure drop 0.00 bar
Refrigerating cap. 5.00 kW

Condenser
Temperature 50.00 °C
Subcooling 2.00 K
Pressure drop 0.00 bar
Calculation

Compressor
Isentr. efficiency 0.800 Auto

Suction line
Superheat 0.00 K
Pressure drop 0.00 bar

Discharge line
Temperature loss 0.00 K
Pressure drop 0.00 bar

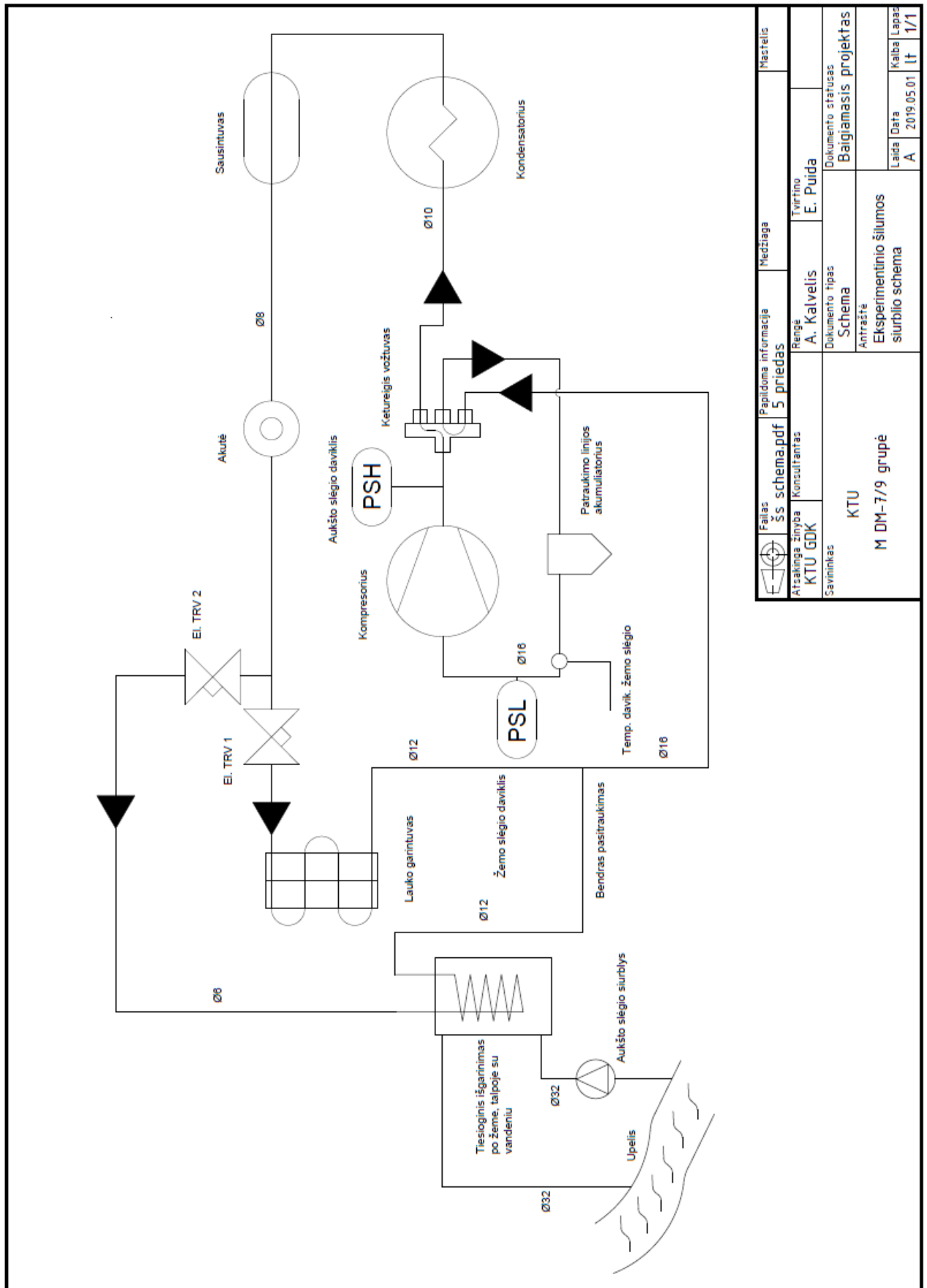
Cycle (F2) | Output parameters (F3) | COP, Mass flow, etc. (F4) | Pipe sizing (F5)

Pipe section	Material	Standard	Pipe Sizing / Single-stage process	
Suction line	Cu	EN 12735-1	next smaller tube	next bigger tube
Discharge line	Cu	EN 12735-1	18 x 1.0 (di=16mm)	22 x 1.0 (di=20mm)
Liquid line	Cu	EN 12735-1	Inner diameter [mm]	16.41
Suction riser	Cu	EN 12735-1	Velocity [m/s]	8.32
Hot gas riser	Cu	EN 12735-1	Equivalent length [K/m]	0.04
			Pressure drop [Pa/m]	645
			Total pressure drop [K]	0.2
			L=10 m Δp=0.4 K	

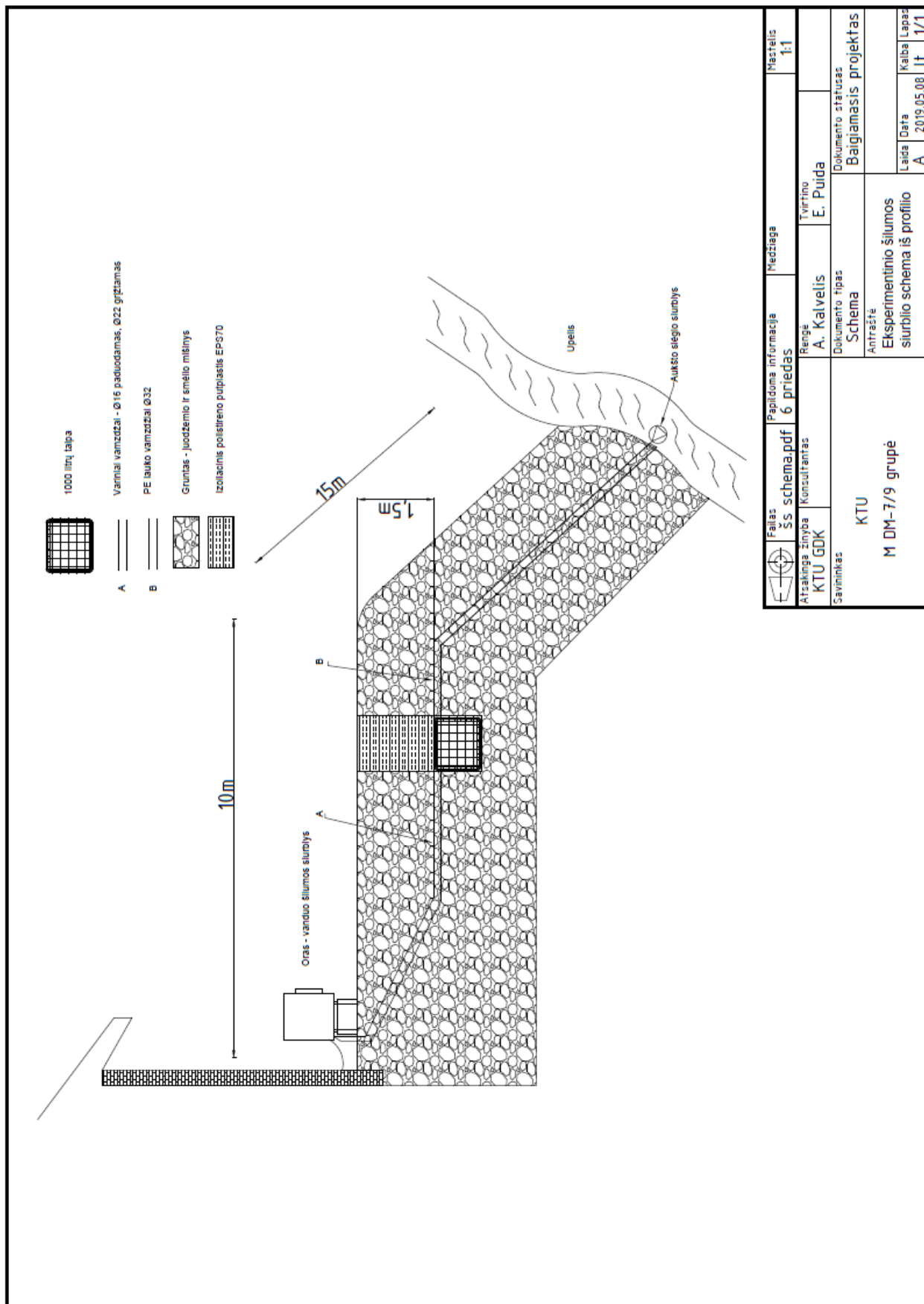
Cycle data

Evaporating temp.	0.00	°C
Mean suction gas temp.	5.00	°C
Mean discharge temp.	76.72	°C
Condensing temp.	50.00	°C
Liquid subcooling	2.00	K
Refrigerating capacity	5	kW

5 priedas. Eksperimentinio šilumos siurblio schema



6 priedas. Eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio

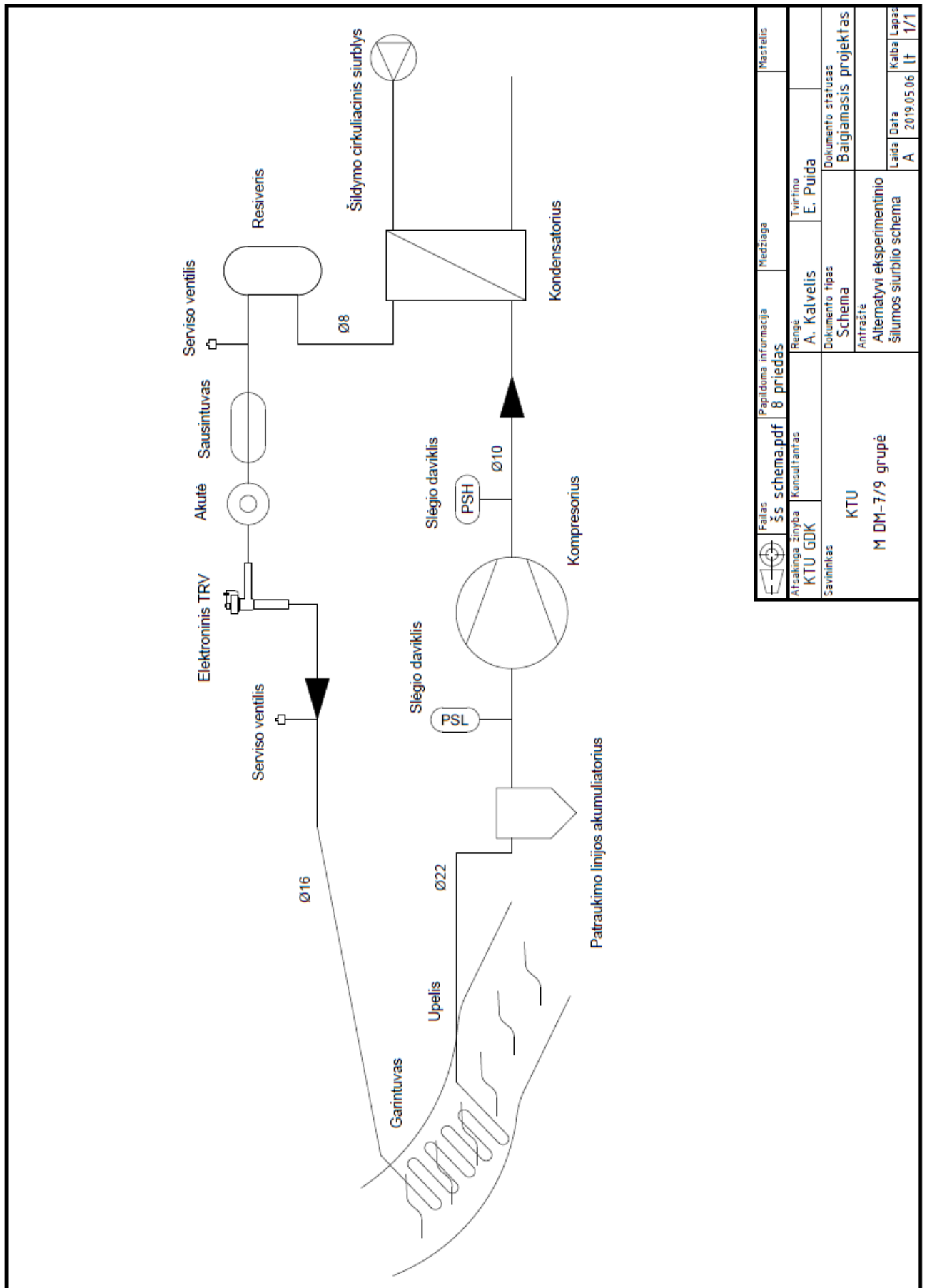


		Papildoma informacija		Medžiaga		Mastelis	
failas ss schema.pdf		6 priedas				1:1	
Ataskaita šiuo KTU GDK		Rengė A. Kalvelis		Tvirtino E. Puida			
Savininkas KTU		Dokumento tipas Schema		Dokumento statusas Baigiamasis projektas			
M DM-7/9 grupė		Antraštė Eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio					
		Leidimo data A		Leidimo data 2019.05.08		Leidimo lapas 1/1	

Diena	2019	Sausis		Nustatymai				Kambario temperatūra			Lauko temp.
		Sunaudota	dkWh	Suma	HP	K.V.	Šildymas	T paduodama	Kamb.Tmin	Kamb. Tmax	
1	22277	40	4.56	32	43	35	2.0	21.4	22.4	21.90	2
2	22312	35	3.99	32	43	35	1.5	21.7	22.2	21.95	0.5
3	22350	38	4.33	32	43	35	1.5	21.4	22.1	21.75	-4.5
4	22388	38	4.33	32	43	35	1.5	21.3	22	21.65	-4
5	22417	29	3.31	32	43	35	1.5	20.9	21.7	21.30	-2.5
6	22454	37	4.22	32	43	35	1.5	21	21.6	21.30	-7
7	22488	34	3.88	32	43	35	1.5	20.5	22.7	21.60	-6.5
8	22525	37	4.22	32	43	35	1.5	19.8	21	20.40	-4
9	22566	41	4.67	32	43	35	1.5	19.6	19.8	19.70	-8.5
10	22594	28	3.19	32	43	35	1.5-->2	19.4	21.6	20.50	-14
11	22637	43	4.90	32	43	35	1.5-->2	19.4	21.8	20.60	-11.5
12	22682	45	5.13	32	43	35	2	19.7	20.3	20.00	-4
13	22718	36	4.10	32	43	35	1.5	18.9	21.8	20.35	0
14	22759	41	4.67	32	43	35	1.5	18.9	21.7	20.30	-1
15	22794	35	3.99	32	43	35	2	18.9	20.9	19.90	-3
16	22825	31	3.53	32	43	35	2	17.9	21.1	19.50	-1.5
17	22877	52	5.93	32	43	35	2	18.1	18.4	18.25	0.5
18	22920	43	4.90	32	43	35	2	18.4	20.3	19.35	-0.5
19	22967	47	5.36	32	43	35	2	20.1	20.6	20.35	-3
20	23015	48	5.47	32	43	35	2	20.1	20.8	20.45	-4
21	23065	50	5.70	32	43	35	2	20.3	21.4	20.85	-6
22	23114	49	5.59	32	43	35	2	19.2	20.4	19.80	-7
23	23146	32	3.65	32	44	35	2	18.9	21.6	20.25	-9.5
24	23194	48	5.47	32	44	35	2	18.9	19.9	19.40	-11.5
25	23238	44	5.02	32	42	35	2	19.2	20.1	19.65	-10.5
26	23279	41	4.67	31	41	35	2	20.1	21	20.55	-8.5
27	23319	40	4.56	31	41	35	2	20.6	21.7	21.15	-11
28	23359	40	4.56	31	41	35	2	21.1	21.8	21.45	-6.5
29	23390	31	3.53	31	41	35	1.5	20.7	21.1	20.9	-2.5
30	23421	31	3.53	31	41	35	1.5	20.6	21.4	21	-3.5
31	23448	27	3.08	31	41	35	2	19.9	21.2	20.55	-5
Iš viso:		1211	138.05								
Vidurkis/para:		39.0	4.45								

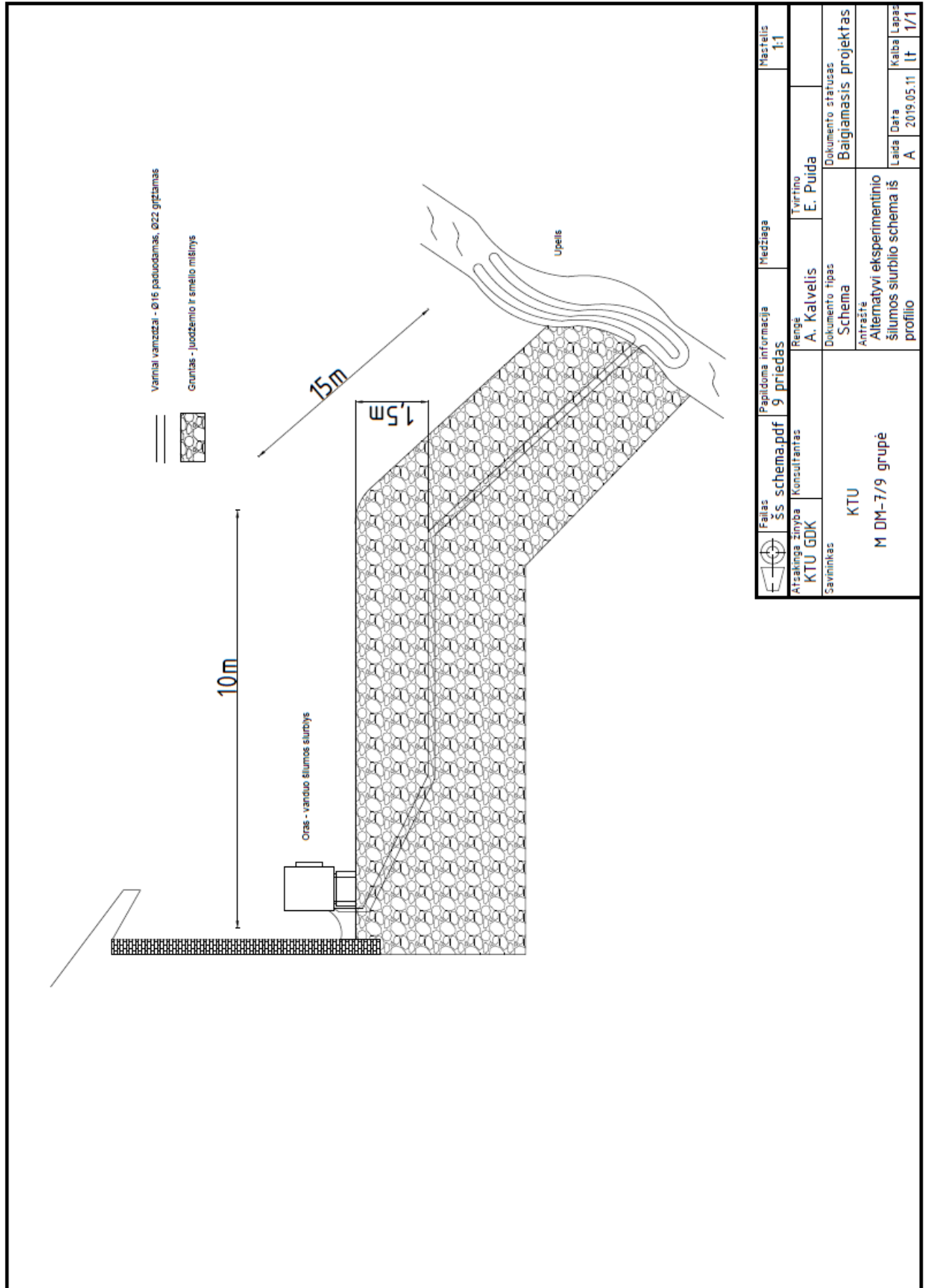
Diena	2019	Vasaris		Nustatymai				Kambario temperatūra			Lauko temp.
		Sunaudota	dkWh	Suma	HP	K.V.	Šildymas	T paduodama	Kamb.Tmin	Kamb. Tmax	
1	23490	42	4.79	31	41	35	2.0	19.7	20.4	20.05	0
2	23529	39	4.45	31	41	35	2.0	20.3	21.3	20.80	1.5
3	23568	39	4.45	31	41	35	2.0	20.4	20.8	20.60	2
4	23602	34	3.88	31	41	35	1.5	20.3	22.6	21.45	-0.5
5	23645	43	4.90	31	41	35	2	19.8	21	20.40	-1.5
6	23689	44	5.02	31	41	35	2	19.2	19.9	19.55	-0.5
7	23728	39	4.45	31	41	35	2	19.2	22.3	20.75	0.5
8	23766	38	4.33	35	20	35	2	18.3	19.7	19.00	0.5
9	23813	47	5.36	37	33	35	5	18.2	18.5	18.35	1
10	23856	43	4.90	37	46	35	3	17.9	21.9	19.90	2.5
11	23896	40	4.56	37	46	35	3	19.7	21.9	20.80	3
12	23922	26	2.96	31	33	35	3	18.3	19.7	19.00	1
13	23952	30	3.42	36	38	35	3	18.3	21.4	19.85	1
14	23987	35	3.99	36	40	35	3	19.8	20.8	20.30	3.5
15	24019	32	3.65	36	40	35	3	19.2	21.4	20.30	3
16	24048	29	3.31	36	40	35	3	19.7	21.7	20.70	5.5
17	24096	48	5.47	36	37	35	3	20.1	20.7	20.40	4
18	24137	41	4.67	36	38	35	3	20.2	22.2	21.20	1
19	24181	44	5.02	36	38	35	3	20.1	22.4	21.25	4
20	24224	43	4.90	36	38	35	3	19.5	20.5	20.00	2
21	24251	27	3.08	36	38	35	3	18.4	21.3	19.85	-2.5
22	24285	34	3.88	36	38	35	3	18.6	25.8	22.20	-4.5
23	24316	31	3.53	36	38	35	3	19.9	25.4	22.65	-3.5
24	24346	30	3.42	36	38	35	3	18.7	24.8	21.75	1.5
25	24376	30	3.42	36	38	35	3	19	22.6	20.8	3
Iš viso:		928	105.79								
Vidurkis/para:		37.1	4.23								

8 priedas. Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema




Failas	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis
Šs schema.pdf	8 priedas		
Atsakinga žinyba	KTU GDK	KTU	
Gavininkas	Konsultantas	KTU	
	Rengė	A. Kalvelis	Tvirtino
	Dokumento tipas	Schema	E. Puida
	Dokumento statusas	Baigiamasis projektas	
	Antraštė	Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema	
	M DM-7/9 grupė		
		Laida	Kalba
		A	2019.05.06
		lt	1/1

9 priedas. Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio



Failas	Papildoma informacija		Medžiaga	Mastelis
Atsakinga žinyba	9 priedas			1:1
KTU GDK	Rengė	A. Kalvelis	Tvirtino	E. Puida
Savininkas	Dokumento tipas	Schema	Dokumento statusas	Baigiamasis projektas
		KTU	Antrastis	
		M DM-7/9 grupė	Alternatyvi eksperimentinio šilumos siurblio schema iš profilio	
	Laida	Data	Kalba	Lapas
	A	2019.05.11	lt	1/1

10 priedas. Antrojo garintuvo skaičiavimas „Solkane“ programoje.

SOLKANE® 407C  t_c 86.03 °C
p_c 46.30 bar
v_c 2.065 dm³/kg Properties

Evaporator Temperature: -5.00 °C Superheating: 5.00 K Pressure drop: 0.00 bar Refrigerating cap.: 5.00 kW	Condenser Temperature: 55.00 °C Subcooling: 0.00 K Pressure drop: 0.00 bar <input type="button" value="Calculation"/>	Compressor Isentr. efficiency: 0.800 <input type="checkbox"/> Auto	Suction line Superheat: 0.00 K Pressure drop: 0.00 bar Discharge line Temperature loss: 0.00 K Pressure drop: 0.00 bar
--	--	--	---

Cycle (F2) | Output parameters (F3) | COP, Mass flow, etc. (F4) | Pipe sizing (F5)

Pipe section	Material	Standard	Pipe Sizing / Single-stage process																																									
Suction line	Cu	EN 12735-1	φ inch Δp bar																																									
Discharge line	Cu	EN 12735-1	Suction line Discharge line Liquid line Suction riser Hot gas riser																																									
Liquid line	Cu	EN 12735-1	Suction line [Cu / EN 12735-1 / Equivalent length]																																									
Suction riser	Cu	EN 12735-1	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 20%;">next smaller tube</th> <th style="width: 20%;">Inner diameter [mm]</th> <th style="width: 20%;">next bigger tube</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>18 x 1.0 <small>(di=16mm)</small></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">18.18</td> <td>22 x 1.0 <small>(di=20mm)</small></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Velocity [m/s]</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>11.56</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">8.96</td> <td>7.40</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Equivalent length [K/m]</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.07</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">0.04</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Pressure drop [Pa/m]</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>1050</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">562</td> <td>353</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Total pressure drop [K]</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.7</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">L=10 m Δp=0.4 K</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table>			next smaller tube	Inner diameter [mm]	next bigger tube		18 x 1.0 <small>(di=16mm)</small>	18.18	22 x 1.0 <small>(di=20mm)</small>			Velocity [m/s]			11.56	8.96	7.40			Equivalent length [K/m]			0.07	0.04	0.03			Pressure drop [Pa/m]			1050	562	353			Total pressure drop [K]			0.7	L=10 m Δp=0.4 K	0.3
	next smaller tube	Inner diameter [mm]	next bigger tube																																									
	18 x 1.0 <small>(di=16mm)</small>	18.18	22 x 1.0 <small>(di=20mm)</small>																																									
		Velocity [m/s]																																										
	11.56	8.96	7.40																																									
		Equivalent length [K/m]																																										
	0.07	0.04	0.03																																									
		Pressure drop [Pa/m]																																										
	1050	562	353																																									
		Total pressure drop [K]																																										
	0.7	L=10 m Δp=0.4 K	0.3																																									
Cycle data																																												
Evaporating temp.	-5.00	°C																																										
Mean suction gas temp.	0.00	°C																																										
Mean discharge temp.	86.12	°C																																										
Condensing temp.	55.00	°C																																										
Liquid subcooling	0.00	K																																										
Refrigerating capacity	5	kW																																										