



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Simas Skačkauskas**

**ŠILUMOS SIURBLIO, NAUDOJANČIO GEOTERMINEJŲ IR  
SAULĖS ŠILUMĄ, TEORINIS IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Vytautas Dagilis

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**ŠILUMOS SIURBLIO, NAUDOJANČIO GEOTERMINEJĄ IR  
SAULĖS ŠILUMĄ, TEORINIS IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinginerija (kodas 621E30001)

**Vadovas**

(parašas) Prof. dr. Vytautas Dagilis  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Rolandas Jonynas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Simas Skačkauskas  
(data)

**KAUNAS, 2017**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

---

Simas Skačkauskas

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

---

„Šilumos siurblio, naudojančio geoterminę ir saulės šilumą, teorinis ir eksperimentinis tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 29 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Simo Skačkausko**, baigiamasis projektas tema „Šilumos siurblio, naudojančio geoterminę ir saulės šilumą, teorinis ir eksperimentinis 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.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_  
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)  
katedros vedėjas doc. E. Puida  
\_\_\_\_\_ (vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS  
Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: „Šilumos siurblio, naudojančio geoterminę ir Saulės šilumą, teorinis ir eksperimentinis tyrimas“ .....  
Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8.....
2. Darbo tikslas: Atlikti šilumos siurblio su vertikaliu gręžiniu individualiam namui, garintuvo parinkimo ir skaičiavimo analizę, bei šilumos regeneraciją vasaros metu .....
3. Darbo struktūra:
  - 3.1 Įvadas
  - 3.2 Šilumos siurblio sistema su vasaros šilumos akumuliacija grunte
  - 3.3 Garintuvo konstrukcijos kūrimas ir tyrimas
  - 3.4 Garintuvo šilumos mainų analizė
  - 3.5 Šilumos siurblio termodinaminė analizė.
  - 3.6 Išvados.....  
.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: rengiant baigiamąjį darbą prisilaikyti Lietuvos Respublikos norminių aktų reikalavimų bei bakalauro baigiamojo darbo apiforminimo reikalavimų .....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.  
Išduota studentui Simui Skačkauskui .....  
Užduotį gavau Simas Skačkauskas ..... 2017-02-02  
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas profesorius Vytautas Dagilis ..... 2017-02-02  
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Skačkauskas, Simas. Šilumos siurblio, naudojančio geoterminę ir Saulės šilumą, teorinis ir eksperimentinis tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Dagilis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Šilumos siurbliai, geoterminė šiluma, horizontalus gręžinys, garintuvo gamyba, regeneracija, saulės kolektoriai.*

Kaunas, 2017. 74 p.

## SANTRAUKA

Pasirinkta termoinžinerijos magistro baigiamojo darbo tema yra aktuali ne tik mokslinė kryptimi, bet ir praktiniu pritaikomumu. Tyrimo objektu pasirinkta individualaus namo modernizaciją su esamu šilumos siurbliu. Šilumos gamyba pasitelkiant šilumos siurblio technologiją darosi komerciškai patrauklesnė dėl: a) iškastinio kuro ribojimo gamtosauginiais bei energetinio saugumo tikslais; b) ši technologija darosi vis efektyvesnė; c) ji priskiriama atsinaujinančiai energijos technologijai. Šis atliktas darbas yra parengtas moksliniais tyrimais, tačiau išskirtinai pritaikytas praktiniu aspektu, kuomet visos iškeltos hipotezės ir uždaviniai pilnai įgyvendinami ir pritaikomi realiose sąlygose, praktikoje. Analizės metu buvo įvertinti esami konstrukcijos trūkumai bei iškeltos atnaujinimo ir tobulinimo darbų galimybės ir kryptis.

Viena iš iškeltų problemų buvo esamo garintuvo konstrukcinis netobulumas, bei šilumos nešėjo keitimo galimybė. Todėl buvo plačiai aptarti garintuvų tipai, jų parametrai, skaičiavimo metodikos bei parinktas optimaliausias individualus variantas. Siekiant praktiškumo ir turimos sistemos parametru, bei neradus analogų rinkoje, garintuvą buvo nuspręsta gamintis individualiai šiam projektui. Todėl buvo pateikti garintuvo gamybos ir surinkimo variantai, pasiūlytas gamybos būdas ir technologija, o atlikus darbus išbandyta praktikoje.

Antra iškelta problema buvo grunto regeneracijos spartinimas ir perteklinės energijos akumuliacija šildymo sezonui. Darbe buvo aptartos įvairios regeneracijos galimybės ir metodai. Pasirinkus ir pritaikius saulės kolektorių nagrinėjamam atvejui, buvo atlikti įvairūs energetiniai skaičiavimai ir parinkimai. Taip pat atlikti matematiniai skaičiavimai ir matavimai, o visa gauta informacija palyginta su analoginiais atvejais. Taip pat buvo išnagrinėti horizontalaus gruntinio šilumokaičio įvairūs variantai ir pritaikymo būdai. Šiuo metu parinktas gruntinis šilumokaitis įvertintas kaip optimaliausias ir tinkamiausias ne tik šilumos siurblio veikimo metu, bet ir perteklinės šilumos kaupimui.

Įvykdžius visas šias modernizacijas buvo įvykdytas pagrindinis tikslas šilumos nešėjo keitimas iš propilenglikolio į vandenį, ko pasėkoje sistema atpiginama. Visa ši kombinuota sistema buvo pilnai išbandyta realiomis veikimo sąlygomis. Atlikus visus praktinius bandymus pavyko

pasiekti užsibrėžto tikslo, gruntas vasaros metu ne tik pilnai regeneravo ir atsistatė į pradinę būseną, bet taip pat pavyko sukaupti santykinai nemažus energijos kiekius tenkinančius visą šildymo sezoną.

Skačkauskas, Simas. Theoretical and Experimental Investigation of the Combined Heat Pump Using Solar and Geothermal Heat: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Vytautas Dagilis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: Heat pump, geothermal energy, evaporator analysis, solar panel, soil regeneration.

Kaunas, 2017. 74 p.

## SUMMARY

Geothermal heat pump and solar energy are future technology in energy engineer. This project is relevant not only to the scientific direction, but also in the practical application. For this research was chosen analysis and modernization of country side house with existing heat pump system. This work is accomplished not only theoretical aspect, with calculations, but also with the real practical aspect, when all the hypotheses and objectives fully implemented and applied in real terms and practices. Also, all modernizations are fully tested in real conditions. The goal of the project is to evaluate existing design weaknesses with new trends and opportunities.

One of the secondary problems are raised by the existing evaporator structural imperfection. At this project was widely discussed evaporator types, parameters, calculation methodology. And after all it was selected individually for heat pump system requirements. All design of the evaporator was decided to make specially for this project, due to lack of analogues in field. It was presented with all manufacturing and assembly options and technology. After evaporator was assembled it was fully tested in practice.

The main issue raised at this project was followed by the regeneration of the soil and accumulation of surplus energy for the cold season. This issue was discussed with various options and regeneration methods, which lead to selecting and applying solar collector. Which were carried out with various energy calculations and selections, implemented mathematical calculations and measurements, and all information with tests was compared with analogue cases in other countries. Also, was done analysis of horizontal ground heat exchanger, various options and customization techniques. Currently existing groundwater heat exchanger was evaluated as optimal and appropriate not only for heat pump operation, but also for excessive heat accumulation.

All this combined system has been fully tested under realistic operating conditions. After all the tests in the field were able to reach its target, when during the summer soil was not only fully regenerated and restored to its original thermal state, but also managed to accumulate relatively substantial amounts of energy for the winter seasons.

## **Turinys**

Paveikslų sąrašas .....	10
Lentelių sąrašas .....	12
ĮVADAS .....	13
1. INDIVIDUALAUS NAMO ŠILUMOS SIURBLIO SISTEMA.....	15
2. GARINTUVO KONSTRUKCIJOS KŪRIMAS IR TYRIMAS .....	16
2.1. Šilumos siurblio efektyvumo analizė .....	16
2.1.1. Kompresorių parinkimas .....	21
2.2. Kompresoriaus parametrų skaičiavimas .....	22
2.3. Šilumos siurblio analizė.....	23
2.4. Garintuvo šiluminiai skaičiavimai .....	26
2.5. Garintuvo skersmens parinkimas .....	28
2.6. Dvifazio srauto slėgio nuostoliai garintuve. ....	30
2.7. Šiluminiai mainai akumuliacinėje talpoje .....	32
2.8. Garintuvo vamzdžio modifikacija .....	32
3. GARINTUVO ANALIZĖ.....	35
3.1. Šilumos mainai.....	35
3.1. Briaunos efektyvumo skaičiavimas.....	36
3.1. Garintuvo montavimas .....	37
3.2. Šilumos nuostoliai garintuve.....	38
4. GARINTUVO GAMYBOS TECHNOLOGIJA .....	40
5. VASAROS ŠILUMOS AKUMULIACIJA GRUNTE.....	44
5.1. Šilumos siurblio eksploatacija .....	44
5.2. Šiluminiai matavimai.....	49
5.3. Šilumos siurblio analizė.....	51
5.4. Saulės kolektoriai .....	54
5.5. Gruntinis šilumokaitis .....	58



5.6. Eksploatacija .....	62
5.7. Temperatūros pasiskirstymas grunte .....	64
5.8. Šilumos akumuliacijos eksperimentas.....	67
5.9. Saulės kolektorių ploto didinimas .....	68
IŠVADOS .....	70
Literatūra ir duomenų šaltiniai .....	72

## **Paveikslų sąrašas**

1.1 pav. Šilumos siurblio patalpos principinė schema. ....	15
5.2 pav. Naudingo veiksmo koeficiento priklausomybė nuo virimo temperatūros garintuve. ....	16
5.3 pav. Naudingo veiksmo koeficiento priklausomybė nuo virimo temperatūros. ....	17
2.4 pav. Srauto netolygumas garintuve.....	18
2.5 Šiuo metu veikianti sistema. ....	19
2.6 pav. Inžektoriaus konstrukcija.....	20
2.7 pav. Sistema su įmontuotu inžektoriumi.....	20
2. 8 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant maksimaliam apkrovimui.....	24
2.9 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant budinčiui apkrovimui.....	25
2.10 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant nominaliam apkrovimui.....	26
2.11 pav. Slėgio nuostoliai ir priklausomybė nuo skersmens.....	31
2.12 pav. Suplotų vamzdelių bandiniai.....	33
2.13 pav. Dvifaziai srautai skirtinguose vamzdžiuose. ....	34
3. 14 pav. Briaunavimo šilumos manai .....	37
3. 15 pav. Garintuvo talpa su pratekančiu vandens srautu.....	38
3. 16 pav. Rėžimų naudingo veiksmo koeficiento kitimas nuo šilumnešio temperatūros.....	39
4.17 pav. Naujo garintuvo koncepcija.....	40
4.18 pav. Suvirintas sulituotas tarp vielos ir vamzdžio.....	41
4.19 pav. Surinktas garintuvas ir patalpintas akumuliacinėje talpoje. ....	42
5.20 pav. Temperatūros pritekėjimas iš gilesnių sluoksnių.....	46
5.21 pav. Specifinės šilumos priklausomybė nuo drėgmės kiekio grunte.....	48
5.22 pav. Grunto metinė temperatūra priklausomai nuo gylio. ....	49
5.23 pav. Vidutinė grunto temperatūra Notingheme.....	50
5.24 pav. Temperatūros metinis nuokrypis nesant geoterminiam šildymui, 1.6m gylyje.....	50
5.25 pav. Grunto temperatūros grafikas. ....	54
5.26 pav. Saulės kolektorių naudingumo priklausomybė nuo temperatūros.....	55
5.27 pav. Saulės kolektorių naudingumo priklausomybė nuo temperatūros.....	56

5.28 pav. Saulės kolektorių išdėstymas ant pastato stogo. ....	57
5.29 pav. Saulės kolektorių naudingo veiksmo grafikas. ....	57
5. 30 pav. Dabartinis šilumokaitis. ....	59
5.31 pav. Didelio paviršiaus šilumokaitis. ....	60
5.32 pav. Sferinis temperatūros pasiskirstymas. ....	60
5.33 pav. Vamzdis vamzdyje šilumokaičio šilumos pasiskirstymas. ....	61
5.34pav. Šilumos siurblio su sezoniniu perteklinės saulės šilumos grąžinimu į gruntą sistema. .	62
5.35 pav. Ciklinio veikimo kreivė. ....	63
5.36 pav. Temperatūros pokytis grunte tolstant nuo šilumokaičio. ....	65
5.37 pav. Šilumos pasiskirstymas prieš pradėdant šildymo sezoną. ....	66
5.38 pav. Bandymo schema. ....	67
5.39 pav. Šilumos pasiskirstymo rezultatai. ....	68

## **Lentelių sąrašas**

2.1 Lentelė. Šilumos siurblio parametrai.....	23
2.2.Lentelė. Taškų parametrai ŠS dirbant Maksimaliu režimu. ....	24
2.3 Lentelė. Taškų parametrai ŠS dirbant budinčiu režimu. ....	25
2.4 Lentelė. Taškų parametrai šilumos siurbliui dirbant nominaliu režimu. ....	25
2.5 Lentelė. Parametrai. ....	29
3.6 Lentelė Garintuvo savybės.....	36

## ĮVADAS

Magistro baigiamajam darbui pasirinkau atlikti individualaus gyvenamojo namo, su jau veikiančiu šilumos siurbliu, energetinę analizę. Darbo metu įvertinau esamos veikiančios sistemos konstrukcijos trūkumus, sistemos tobulinimo galimybes ir komponentų atnaujinimus. Taip pat išnagrinėjau sistemos pritaikymą su kitomis, individualiomis sistemomis. Visas modernizavimo ir atnaujinimo vertinimas vyko palaipsniui ir kompleksiskai, kuomet kiekvienas atnaujinimo etapas atliekamas nuo informacijos paieškos teorinės dalies analizavimo iki praktinio pritaikymo. Įvertinus jau veikiančią sistemą buvo išsikelti keli du pagrindiniai tikslai: naujos garintuvo konstrukcijos sukūrimas ir sistemos optimizavimas pritaikius saulės kolektorius.

Šilumos gamyba pasitelkiant šilumos siurblio technologiją darosi komerciškai patrauklesnė dėl: a) iškastinio kuro ribojimo gamtosauginiais, bei energetinio saugumo tikslais; b) ši technologija darosi vis efektyvesnė; c) ji priskiriama atsinaujinančiai energijos technologijai. Kaip žinia, šilumos siurbliai, kondicionieriai ir įvairūs kompresoriniai įrenginiai itin išpopuliarėjo per pastaruosius kelis dešimtmečius. Spartus jų naudojimas pramonėje, buityje, visuomeniniuose pastatuose, gamintojus privertė atsižvelgti ne tik į ekonominę naudą, bet ir į ekologiją, ilgaamžiškumą. Taip pat prie to nemažai prisidėjo ir Europos bei kitų šalių sukurti ekologiniai ir energetiniai reglamentai. Tokiam augimui didžiausią įtaką turėjo kompresorių gamybos medžiagų technologijos ir sprendiniai. Dabartinių kompresorių vystymasis nebėra toks spartus ir greitas, koks buvo per pastaruosius dešimtmečius. Tokiam technologiniam vystymuisi didžiausią įtaką darė beveik idealus metalų ir plastikų panaudojimas gamyboje, kuomet pasiekiamos puikios energetinės ir mechaninės savybės.

Siekiant sukurti gerą šilumos siurblio sistemą nepakanka atnaujinti ar tiksliai parinkti vieną iš komponentų, pavyzdžiui kompresorių. Kaip žinia šilumos siurblių sudaro ir kiti svarbūs elementai, kurie savo ruožtu sudaro apčiuopiamą dalį viso įrenginio efektyvumo. Taip pat reikia užtikrinti gerus šilumos mainus, ypač tuomet kai turime žematemperatūrius šilumos mainus, tai pasiekama didinant šildomų paviršių plotus ir tiksliai parenkant šilumokaičių tipus.

Kaip žinia giluminiame grunte, Lietuvos sąlygomis, temperatūra gali siekti nuo 5 °C iki 11 °C priklausomai nuo grunto gylio ir geografinės, reljefinės padėties. Patikimam garintuvo darbui reikia ne tik didelio mainų ploto, bet ir maksimalaus šilumos atidavimo koeficiento iš darbo agento pusės. Gerą šilumos atidavimo koeficientą nesunku pasiekti vandens pagalba, tereikia užtikrinti pakankamą vandens debitą ir tinkamą paviršiaus plotą. Tokiu atveju, šilumos mainų efektyvumas iš agento pusės yra stabdantis bendrą šilumos perdavimo efektyvumą, todėl šiuos mainus reikia itin kruopščiai optimizuoti, išnaudojant konstrukcinius, hidrodinaminius bei šiluminius faktorius. Nes kiekvienas prarastas šilumos laipsnis dėl nepilnos rekuperacijos gali

sudaryti apie 3% šilumos siurblių bendrųjų nuostolių. Tai yra sudėtingi šilumos mainai tiek dėl dvifazio srauto, mainų kompleksiško tiek dėl nedidelių temperatūros skirtumų. Moksliniais tyrimais [17] buvo pastebėtas, kad tekančio fluideo šilumos mainai esant virimui, skiriasi nuo mainų, kuomet tekėjimo nėra, nes skysčio plėvelės tekėjimo įtaka mainų efektyvumui gali būti didesnė už virimo mainų dedamąją.

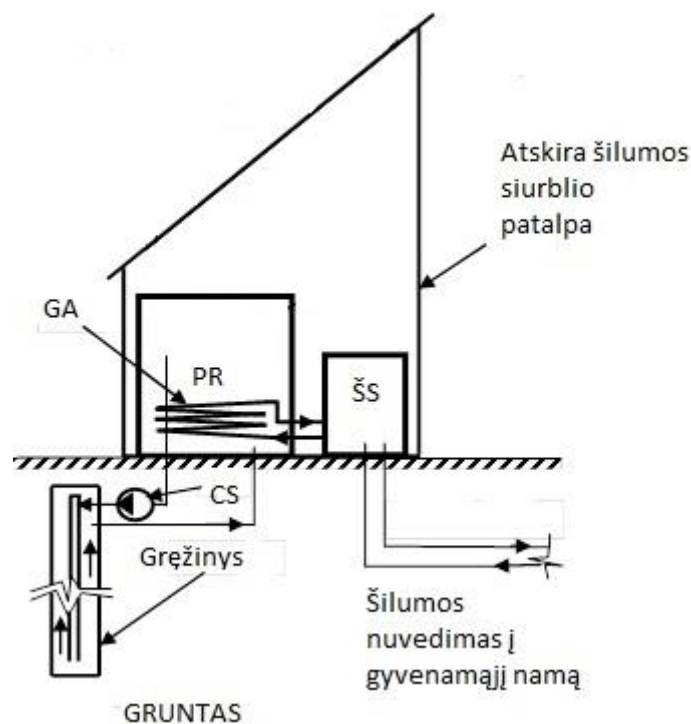
Optimizuojant šilumos siurblių buvo iškelta problema, kaip ir koku būdu greitai ir ekonomiškai regeneruoti grunto terminį sudrumstimą. Bei esant galimybei sukaupti perteklinius santykinai pigios energijos kiekius šildymo sezonui. Dėl to buvo atlikta studija ir įvertintos bei aptartos įvairios galimybės, bei pasirinktas vienas optimaliausias variantas. Pasirinktas variantas buvo įvertintas technologiškai bei pilnai įgyvendintas. Atlikti eksperimentiniai matavimai, palyginti su teoriniais skaičiavimais, bei palyginti su kitų mokslininkų atliktais eksperimentiniais tyrimais.

Tuo tikslu buvo suderintos dvi iš dalies skirtingos sistemos: saulės kolektorių ir geoterminio šildymo. Pasinaudojus saulės kolektoriaus sistema, perteklinė energija buvo sukaupta (akumuliuota) grunte. Tai atlikta pasinaudojus tuo pačiu gruntu šilumokaičiu ir jo sistema. Tai atlikta tikslu padidinti šilumos siurblio efektyvumą šaltuoju metų laiku. Taip pat buvo atlikti visi parenkamieji skaičiavimai bei sistemos paleidimas ir eksploatacijos įvertinimas.

# 1. INDIVIDUALAUS NAMO ŠILUMOS SIURBLIO SISTEMA

Individualų namą ir jo šildymo sistemą galima suskirstyti į dvi atskiras dalis, gyvenamasis pastatas ir šilumos siurblio patalpa. Individualaus namo šildymo sistema sudaro ortakinis šildymas ir šilumos siurblys su vertikaliu gruntiniu šilumokaičiu. Tokiam sistemos deriniui ir pasirinkimui įtaka darė gyvenamojo namo paskirtis ir sistemos paprastumas, bet svarbiausias veiksnys buvo santykinai žemos temperatūros šilumos šaltinis. Pasaulinėje praktikoje buvo pastebėta, kuomet naudojami žemos temperatūros šaltiniai, optimaliausia naudoti orinį arba grindinį šildymo būdą. Šie du būdai nereikalauja didelės temperatūros šilumos šaltinio, kaip radiatorinis.

Viena iš pagrindinių, šiame darbe, analizuojamų sistemų yra vertikalus gręžinys su akumuliacine talpa. Akumuliacinės talpos tūris buvo parinktas atsižvelgiant į gruntinio šilumokaičio tūrį, kuomet gruntinio šilumokaičio naudingas tūris yra panašus kaip ir akumuliacinės talpos tūris, atlikus gruntinio šilumokaičio montavimo ir kasimo darbus, buvo pasiektas naudingas tūris apie  $0,3 \text{ m}^3$ . Akumuliacinė talpa yra stačiakampė uždara talpykla, pilnai izoliuota izoliacine medžiaga, kurios šilumos laidumas  $0.033 \lambda \cdot \text{W/K}$  ir joje sumontuotas šilumos siurblio garintuvas. Akumuliacinė talpa yra pilnai atidaroma ir patogiai eksploatuojama. Šalia talpos sumontuotas cirkuliacinis siurblys, kuris pastoviai arba cikliškai, priklausomai nuo darbo režimo, perneša vandenį per gruntinį šilumokaitį, bei atlieka maišymą pačioje talpoje. Toks intensyvus vandens maišymasis akumuliacinėje talpoje užtikrina gerą garintuvo veikimą ir intensyvius šilumos mainus.



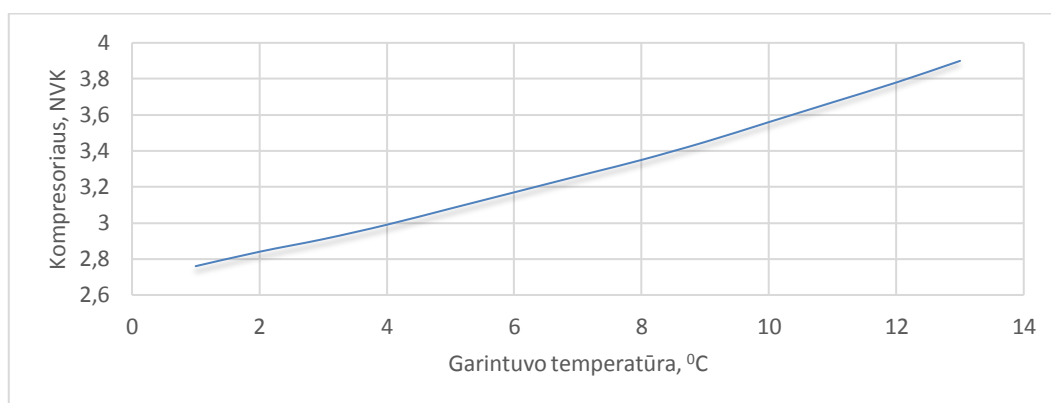
1.1 pav. Šilumos siurblio patalpos principinė schema.

Viršuje pateiktame paveikslėlyje schematiškai išdėliotos visos pagrindinės šilumos siurblio sudedamosios dalys ir įrenginiai. Kurioje ŠS-šilumos siurblys, GA-garintuvas, CS-cirkuliacinis siurblys, PR- akumuliacinė talpa. Visa vidaus sistema užpildyta propilenglikoliu, o šilumos siurblio sistema užpildyta R134a darbo agentu.

## 2. GARINTUVO KONSTRUKCIJOS KŪRIMAS IR TYRIMAS

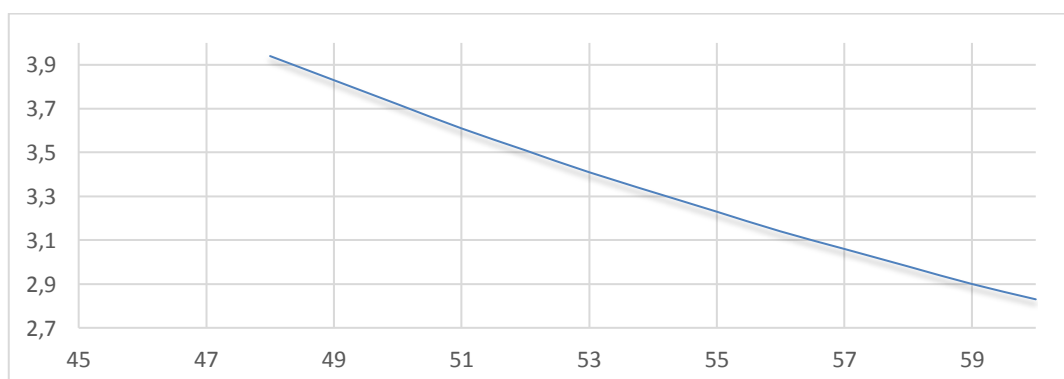
### 2.1. Šilumos siurblio efektyvumo analizė

Šilumos siurblių darbui bei jų efektyvumui įtaką daro nemažai veiksnių. Net ir parinkus moderniausią įrangą ne visada šilumos siurblio sistema būna efektyvi, reikia atkreipti dėmesį ir į turimus parametrus. Didžiausią tam įtaką turi temperatūrų skirtumas tarp grunto ir patalpų, arba kitaip tariant skirtumas tarp kondensacijos ir virimo temperatūrų. Dauguma kompresorių gamintojų pateikia kompresorių efektyvumo grafikus nuo temperatūrų. Kintant temperatūrai garintuve gauname tokį naudingo veiksmo koeficiento kitimą:



5.2 pav. Naudingo veiksmo koeficiento priklausomybė nuo virimo temperatūros garintuve.

Matavimai pateikiami esant maksimaliam apkrovimui kuomet kompresorius veikia didžiausiame temperatūrų skirtume. Kintant kondensatoriaus temperatūrai, taipogi kinta kompresoriaus naudingo veiksmo koeficientas. Tai atvaizduojama šiame paveikslėlyje:





5.3 pav. Naudingo veiksmo koeficiento priklausomybė nuo virimo temperatūros.

Iš abiejų grafikų matosi, kad labiau kompresorių efektyvumui darė įtaką virimo temperatūra ir garintuvo darbas. Kiekvienas aukštesnis virimo temperatūros laipsnis padidina kompresorių efektyvumą 3-3,5 proc. Kondensacijos temperatūros efektyvumas darė mažesnę įtaką, todėl didesnis dėmesys yra skiriamas garintuvui, jo tobulinimui ir modifikavimui.

Kiekvieną šilumos siurblių sudaro bent keli šilumokaičiai, šiame tiriamajame projekte sistemą sudaro net 5 atskiri šilumokaičiai: garintuvas, kondensatorius, saulės kolektoriai, gruntinis šilumokaitis, patalpoms šildyti skirtas orinis šilumokaitis. Kiekvienas iš šilumokaičių turi savo termodinaminius nuostolius dėl nepilnos rekuperacijos. Šie nuostoliai itin svarbūs galiniame taške, kur kiekvienas prarastas virimo temperatūros laipsnis, daro 3 - 3,5% šilumos siurblio nuostolių.

Eksploatuojant šilumos siurblių, buvo pastebėtas garintuvo neekonomiškumas bei netinkamas veikimas, todėl buvo nuspręsta atlikti garintuvo analizę. Pagrindinė garintuvo analizės priežastis cirkuliuojančio fluideo keitimas į vandenį. Keitimo priežastys yra kelios, viena iš jų ekonominė, o kita ekologinė. Ekologinę įtakojo sąlyga, kad tokių gręžinių šilumokaičius reikia užpildyti tik savaimė degraduojančiomis ir aplinkai draugiškomis medžiagomis, nes tik jos, jeigu patenka į požeminius vandeningus sluoksnius, jų neužteršia. Leidžiama naudoti vandens ir etanolio, vandens ir propilenglikolio mišinius ar kitus netoksiškus ir biologiškai greitai degraduojančius tirpalus, medžiagas ar mišinius. Kartais pasitaiko atveju kuomet šios sistemos būna užpildytos etilenglikoliu, arba dar vadinamu automobiliniu antifirzu, o tai daroma, nes jis yra žymeig pigesnis. Ekonominę aspektą įtakojo tai kad vanduo visada yra pigesnis už bet kokį kitą šilumos nešėją. Todėl ir buvo nuspręsta apžvelgti šias modernizacijos galimybes, kuomet garintuvas modernizuojamas arba keičiamas nauju. Prieš kuriant šią sistemą buvo nuspręsta sumontuoti „Baudelot“ tipo šilumokaitį (garintuvą). Viena iš pagrindinių problemų šis šilumokaičio tipas nėra atsparus apšalimui, nes susidaręs, net ir menkiausias, ledu sluoksnis gali pažeisti garintuvo konstrukciją. Kita problema su kuria buvo susidurta eksploatuojant šio tipo garintuvą yra fazinio virsmo suvaldymas. Šios dvi pagrindinės priežastys ir daro įtaką šilumokaičio modernizacijai ir keitimui. Kaip žinome, dažniausiai garintuvai skirstomi į dvi rūšis ir jos porūšius:

- 1) Tiesioginio plėtimosi garintuvai ir jo porūšiai:
  - Gaubtinio vamzdinio;
  - Aušinimo purkštukais;
  - Tiesioginio plėtimosi;
  - Plokštelinis;
  - Plokšteliniai-gaubtiniai.

2) Užtvindomo plėtimosi garintuvai ir jo porūšiai:

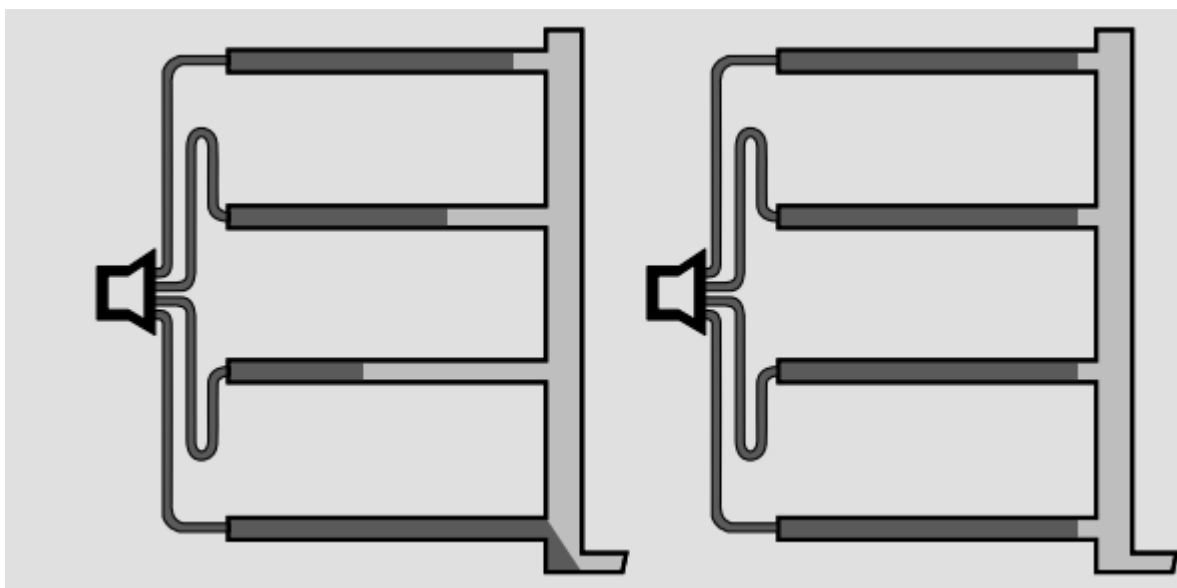
Gaubtinis

Kanalinis

Gaubtinis-vamzdinis.

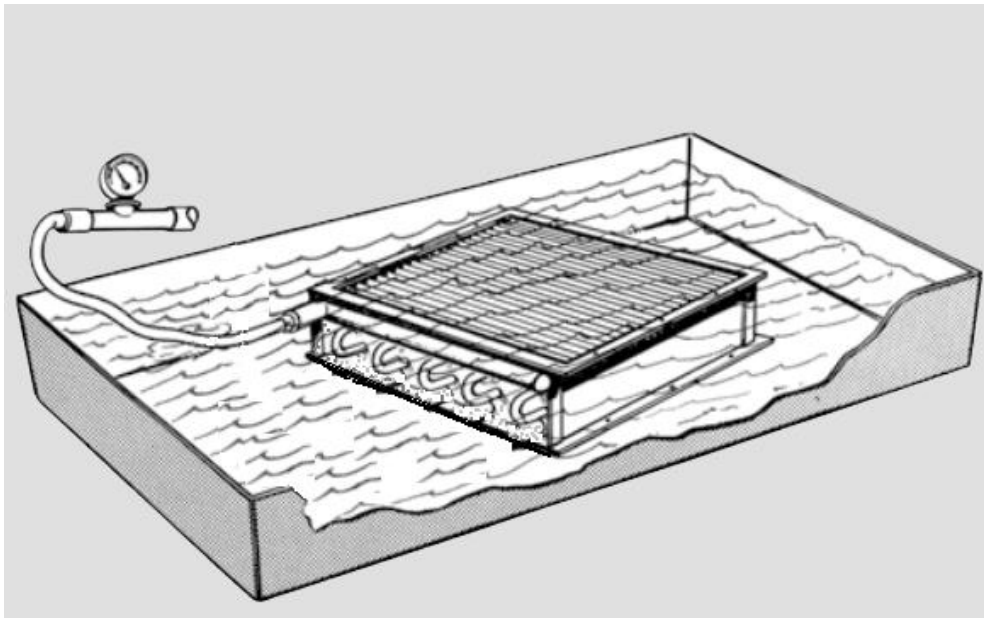
Taip pat šilumokaičiai gali būti suskirstyti į dar smulkesnius porūšius, priklausomai nuo konkretaus gamintojo ar individualių modifikacijų. Šiuo metu dažniausiai naudojami ir labiausiai paplitę yra plokšteliniai ir gaubtiniai šilumokaičiai. Tačiau jie yra visiškai netinkami išsikeltoms sąlygoms ir veikimui su vandeniu.

Šiuo metu yra naudojamas „Baudelot“ tipo šilumokaitis kuris buvo įvertintas kaip netinkamas, kuomet tiekiamas vanduo, žiemos metu, gali užšalti. Šis garintuvas kaip ir dauguma kitų garintuvų dirba su dideliu 4-5 °C temperatūros perkričiu. O tai gali daryti įtaką garintuvo apšalimui, nes žiemos metu į garintuvą tekėtų maždaug 1-2 °C temperatūros gręžinio vanduo. Kita šio garintuvo keitimo, modernizacijos priežastis - nevienodas dvifazio fluido srautas vamzdeliuose. Srauto nevienodumas labai gerai matosi 2.4 pav., tokiam nevienodumui didžiausią įtaką daro kolektoriaus sandara ir konstrukcija.



2.4 pav. Srauto netolygumas garintuve.

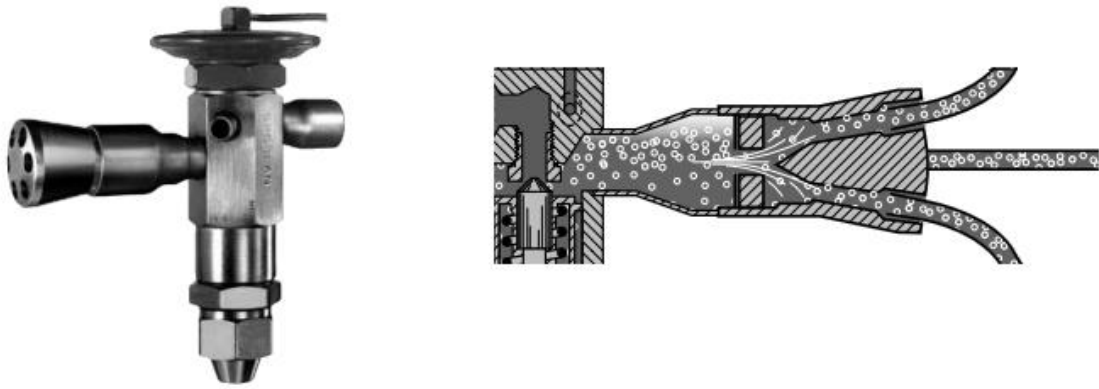
Kairiajame paveikslėlyje pavaizduotas netolygus skystos fazės pasiskirstymas kanaluose, kai dalis skystos fazės neišgaravusios patenka į kompresorių. Taip pat tokį nevienodumą gali įdaryti įtaką ir mūsų pasirinkta sistema, kuomet šilumokaitis yra panardintas akumuliacinėje talpoje. Dešiniajame paveikslėlyje pavaizduotas idealus šilumokaičio išnaudojimas ir dvifazio srauto pasiskirstymas visuose kanaluose. Tai pasiekti yra sudėtinga ir reikalauja idealių šilumos mainų iš abiejų šilumokaičio pusių.



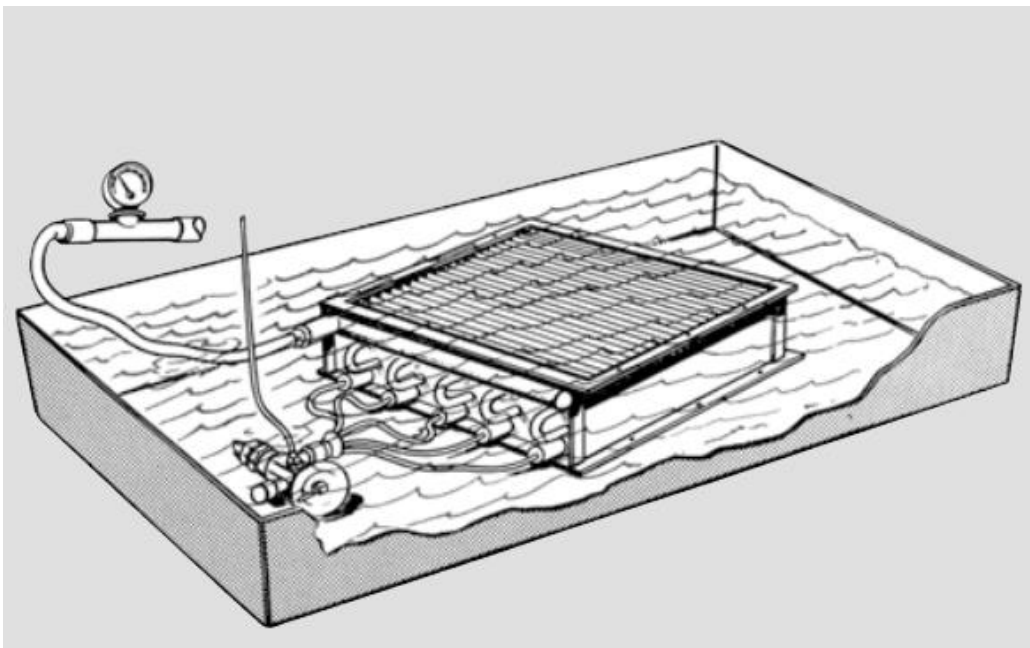
## 2.5 Šiuo metu veikianti sistema.

Esant tokiam netolygiam pasiskirstymui nenaudingai prarandama apie 25% šilumokaičio ploto. Tokio garintuvo, kai nėra sureguliuotas srautas, sudėtingėja srauto valdymas. Valdymo pultas užfiksavęs skystos fazės darbo agentą kolektoriuje dar labiau pridaro valdymo vožtuvą, o dėl padidėjusių slėgio nuostolių, papildomai apkraunamas ir pats kompresorius. Tyrimais [17] buvo pastebėta, kad sistemoje išaugus slėgiui 1 baru, elektros sąnaudos padidėja 2,5% - 3%. Atlikus eksperimentinius matavimus su įvairiais slėgiais, buvo pastebėta tendencija: didėjant slėgiui garintuve šilumos mainai vyksta lėčiau, nežymiai mažėja garintuvo naudingo veikimo koeficientas.

Vienas iš problemos sprendimo būdų yra inžektoriaus pastatymas prieš garintuvą, kuris suvienodintų skystojo agento padavimą į kiekvieną šilumokaičio vamzdelį. Inžektoriaus veikimas yra nesudėtingas, tačiau pats indžektorius gaminamas itin preciziškai ir reikalauja didesnės priežiūros. Tokių indžektorių būna įvairių konfigūracijų ir našumų, jo veikimo principų, parodyti pavyzdžiai 2.4 pav.



2.6 pav. Inžektoriaus konstrukcija.



2.7 pav. Sistema su įmontuotu inžektoriumi.

Taip atrodo sistema su įmontuotu inžektoriumi, tačiau tokia sistema pabrangsta, reikalauja didelių investicijų į įrangą ir priežiūrą. Sumontavus inžektorių efektyviau bus išnaudojamas paviršiaus plotas, tačiau tai neišsprendžia apšalimo galimybės. Todėl bendromis diskusijomis buvo nuspręsta pasirinkti kitą garintuvo tipą bei pasirinkti šiuo metu pigiausią ir patikimiausią garintuvo tipą, tai yra tiesioginio plėtimosi gyvatuko formos. Dažniausiai tokio tipo garintuvai naudojami šaldytuvų gamyboje. Šis variantas buvo pasirinktas dėl konstrukcijos paprastumo ir dėl šiuo metu jau esančių techninių galimybių, kuomet garintuvus montuojamas akumuliacinėje talpoje, tokiu atveju nereikia perdarinėti jau esamos sistemos. Kaip minėjau šiuo metu garintuvus yra panardintas į akumuliacinę talpą, kuri užpildyta propilenglikoliu ir tiesiogiai, be papildomų šilumokaičių, per cirkuliacinį siurbį sujungta su giluminiu gręžiniu.

Kitas šio garintuvo privalumas, kad jis yra atsparus apšalimui ir minusinėms temperatūroms, o susidaręs nedidelis ledo sluoksnis yra laikomas kaip naudingas. Mokslininkų atliktais tyrimais buvo įrodyta [16], kad nedidelis paviršiaus apšalimas tik didina paviršiaus plotą ir gerina mainus. Tyrimai parodė, kad ledo iki 2 mm storis paviršiuje, dar nėra žalingas, tačiau toliau didinant, mažėja šilumos mainai su vandeniu, nes vandens ledo šilumos atidavimo koeficientas yra ženkliai mažesnis. Tokiu atveju susidaręs didesnis ledo sluoksnis privalo būti pašalinimas. Toks procesas vyksta apsukant šilumos siurblio veikimo ciklą arba laukiant kol nutirps savaime. Dažniausiai naudojamas atvejis kai kas kelias valandas šilumos siurblys išjungiamas.

### 2.1.1. Kompresorių parinkimas

Kompresorius yra vienas iš pagrindinių šilumos siurblio įrenginiu, jis atlieka darbo agento cirkuliaciją sistemoje. Kompresoriai šildymo sistemoms parenkami atsižvelgiant į šaldymo agento virimo temperatūrą. Kompresorių arba šalčio mašinų kiekis parenkamas įvertinus atitinkamą virimo temperatūrą pagal šalčio našumą  $Q_0$  (kW) ir įvertinus šaldymo agento kondensacijos ir virimo temperatūras. Nustačius temperatūras pagal grafines priklausomybes, kompresoriaus našumas  $Q_0$  gali būti paskaičiuotas:

$$Q_0 = n \sum Q_k / b \quad (2.1)$$

Čia  $Q_0$  – atitinkamoje virimo temperatūroje veikiančio kompresoriaus šaldymo galia, kW;  $n$  – šalčio nuostolių kompresoriuje ir vamzdynuose koeficientas;  $b$  kompresoriaus veikimo trukmė per parą koeficientas ( $b=0.83\dots0.92$ );  $\sum Q_k$  artimos temperatūros šaldomų objektų kompresorių suminė šiluminė apkrova.

Kuomet šiluminė apkrova per parą išlieka nepastovi ir dažnai kinta, šilumos mainų su stūmokliniais kompresoriais skaičių reikia parinkti tokį, kad gerokai padidėjus apkrovai ir šilumos poreikiui būtų galima įjungti norimos galios rezervinį šildymo agregatą. Taigi, esant kintamai šiluminei apkrovai reikia maksimalią šildymo galią padalyti į 2-3 stūmoklinius kompresorius. Dažniausiai tokie kompresoriai parenkami vienodos galios ir vienodų parametrų. Toks parinkimas supaprastina eksploataciją ir padidina sistemos ilgaamžiškumą, tačiau pati sistema išbrangsta ir pasidaro ne konkurencinga. Nes išauga ne tik elektros sąnaudos, bet ir remonto darbai, bei cirkuliuojančio šilumnešio kiekis ir sistemos valdymas. Kuriant sistemą buvo įvertintas ir prietaisų veikimo periodiškumas. Tokiam veikimui didelę įtaką daro dažnai kintanti vidaus ir lauko temperatūra, o tai labai dažnas atvejis tokiose klimatinėse sąlygose, todėl privalu turėti kitą alternatyvią sistemą užtikrinančią nuolatinį sklandų veikimą. Tokiu atveju optimaliausia naudoti

akumuliacinę talpą, tačiau jos dydį ir pagrįstumą reikia įvertinti individualiais atvejais, nes esant mažatemperatūriams mainams reikalingi dideli mainų plotai. Nes privalu užtikrinti pilna rekuperaciją, o dideli mainų plotai pabrangina sistemos gamybą. O tai sumažina sistemos konkurencingumą ir atitolina atsiperkamumą.

Mūsų turimu atveju temperatūra ir šilumos poreikis gali svyruoti kelis kartus per parą, todėl pravartu turėti kelis nedidelius kompresorius, tačiau individualiam namui kompresoriai ir taip yra santykinai nedideli. Todėl parinkus sistemą su keliais kompresoriais, šilumos siurblio sistema pabrangsta apie 30-40 %. Todėl buvo pasirinkta šilumos siurblio sistema su akumuliacine talpa. O visa sistema sumontuota be tarpinių šilumokaičių ir atskirų posistemių. Sistema buvo montuojama taip, kad garintuvas yra tiesiogiai sumontuotas akumuliacinėje talpoje.

## 2.2. Kompresoriaus parametrų skaičiavimas

Įvertinus visas dedamąsias, bei kiekvieno šilumokaičio privalumus ir trūkumus, bei atsižvelgus į esama sistemą, nuspręsta naudoti gyvatuko tipo šilumokaitį. Parinkus garintuvo tipą atlikti parenkamieji skaičiavimai. Skaičiavimai atlikti siekiant patiems pasigaminti, o ne pirkti šilumokaitį, tokiu būdu optimaliai jį pritaikant esamai sistemai. Norint apskaičiuoti garintuvo šiluminį galingumą bei kompresoriaus aprašomąjį tūrį, pirmiausiai reikia rasti sistemoje cirkuliuojančio darbo agento kiekį. Nagrinėjamo ploto, gyvenamajam namui, šilumos poreikis esant vidutinei žiemos temperatūrai Kauno mieste yra maždaug 5500 W. Inžinerinėje praktikoje buvo pastebėta, kad šilumos siurbliui cirkluoja maksimaliai 0,7 darbo laiko koeficientu (DLK). Paskaičiuoti darbo agento kiekį cirkuliuojantį sistemoje pasitelkiau formulę:

$$g = \frac{Q}{(h_2 - h_3) \cdot DLK} = \frac{5500}{(420,02 - 247,28) \cdot 0,366} = 0,048 \frac{kg}{s} \quad (2.2)$$

Paskaičiuoti garintuvo šiluminį galingumą galima pagal šią formulę:

$$Q_0 = g \cdot (h_1 - h_2) = 0,042(395,46 - 253,18) = 5,98, kW \quad (2.3)$$

Kompresoriaus aprašomas tūris paskaičiuojamas vertinant taip vadinamą kompresoriaus pripildymo koeficientą. Šis koeficientas parodo, kokie yra kompresoriaus tūriniai nuostoliai, tiksliau tariant, tai yra santykis realaus tūrinio kompresoriaus našumo su teoriniu:

$$\lambda = \frac{V}{V_T} \quad (2.4)$$

Vertinat šiuos nuostolius, dėl pratekėjimų kompresorius turi išvystyti didesnę tūrinių našumą. Pastarąjį suskaičiuoti, naudodamasis CoolPack programa susiradau siurbiamų į kompresorių darbo agento R134a garų savitąjį tūrį.

$$V_T = \frac{v_1 \cdot g}{\lambda} \quad (2.5)$$

Kompresoriaus aprašomas tūris priklauso nuo sūkių skaičiaus ir yra skaičiuojamas pagal 2.5 formulę:

$$V_{ap} = \frac{V_T}{n} = \frac{v_1 \cdot g}{\lambda \cdot n} \quad (2.6)$$

Norint apskaičiuoti kompresoriaus aprašomąjį tūrį, reikia priimti kompresoriaus sūkių ir pripildymo koeficiento reikšmes. Apžvelgęs šilumos siurbliuose naudojamų kompresorių technines charakteristikas [2] buvo įvertinta, kad kompresorius sukasi 49 aps/min greičiu, o jo pripildymo koeficientas lygus 0,8. Įstatęs šiuos dydžius į 2.5 formulę apskaičiavau kompresoriaus aprašomąjį tūrį, kuris lygus 77,03 cm<sup>3</sup>.

### 2.3. Šilumos siurblio analizė

Šilumos siurblio garintuvo našumą apsprendžia ir šildomam namui reikiamas šiluminis našumas bei šilumos transformacijos koeficiento dydis, kuris paprastai skaičiuojamas sudarius ciklą konkrečioms darbo sąlygoms, panaudojus p-h diagramą. Šilumos siurblio veikimo režimus galima suskirstyti į 3 tipus, kurie pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 Lentelė. Šilumos siurblio parametrai

Režimo pavadinimas	Virimo temperatūra	Garavimo temperatūra
Maksimalus	34°C	-3°C
Nominalus	38°C	2°C
Budintis	28°C	5°C

Šio tiriamojo darbo atveju visi skaičiavimai atlikti sistemai dirbant maksimaliu galingumu, t.y. esant santykinai, šioms klimatinėms sąlygoms, žemai aplinkos temperatūrai žiemos metu, o vidaus temperatūra palaikoma atitinkanti higienos normas. Reikia pastebėti, kad tokia, žema lauko temperatūra būna pakankamai trumpą laiką, todėl ir šilumos siurblys maksimaliu galingumu dirbs tik trumpą žiemos dalį. Likusį laikotarpį šilumos siurblys dirbs esant vidutinei žiemos temperatūrai. Pastaroji vidutinė temperatūra, penkių šalčiausių žiemos mėnesių Kauno mieste,

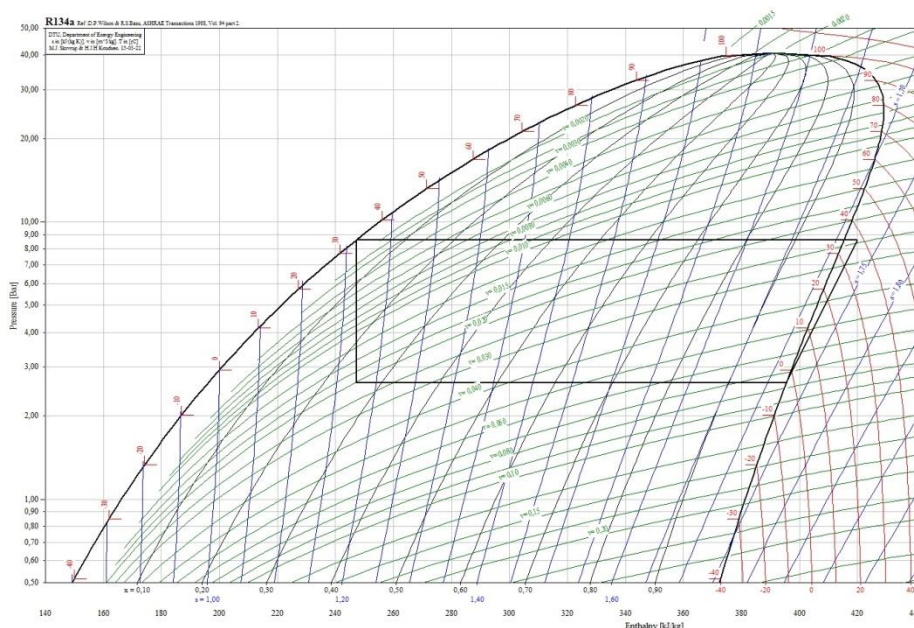
praėtų metų duomenimis, buvo  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  [29]. Šiuo darbo režimu šilumos siurblys dirbs didžiausią savo darbo laiko dalį, todėl jį tolimesniuose skaičiavimuose įvardinsime nominaliu.

Be šių dviejų pagrindinių šilumos siurblio darbo režimų dar galimas ir trečiasis – budintis. Šiuo režimu šilumos siurblys dirba tuo atveju, kai gyventojai yra laikinai išvykę, o name reikia palaikyti tik minimalią temperatūrą apie  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pirmam ir antram atvejui namo viduje palaikoma temperatūra  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tokiu atveju skaičiuotinas temperatūrų skirtumas tarp aplinkos oro namo viduje ir išorėje atitinkamai yra  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $18 - (-22)$ ) ir  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $18 - (-3)$ ). Susumavus bendrą šiluminį galingumą nuo veiklos ir veikiančių įrenginių, numatoma aplinkos oro temperatūra namuose turėtų atitikti higienos normas ir siekti  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Atsiradus minėtiems papildomiems šilumos šaltiniams, namuose būtų palaikoma  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūra, kai vidutinė tiekiamą temperatūra yra  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naudodamasis šio agento p-h diagrama sudariau ciklą, kuriuo turėtų dirbti šilumos siurblys.

2.2.Lentelė. Taškų parametrai šS dirbant Maksimaliu režimu.

Taškas	T, C <sup>0</sup>	P, bar	v, m <sup>3</sup> /kg	h, kJ/kg	s, kJ/kg K
1	-3,00	2,62	0,077	395,45	1,724
2	38,1	8,63	0,024	420,02	1,724
3	34,00	8,63	N/A	247.2	N/A
4	-3,00	2,62	0,077	247.2	1,724

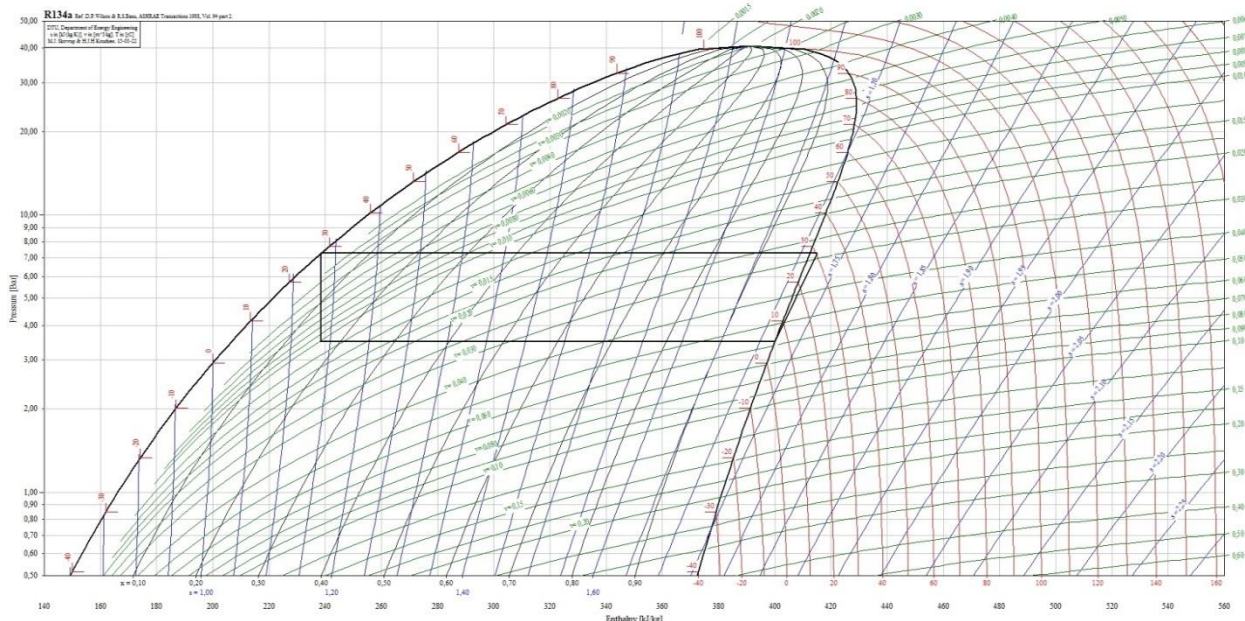


2. 8 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant maksimaliam apkrovimui.



2.3 Lentelė. Taškų parametrai ŠS dirbant budinčiu režimu.

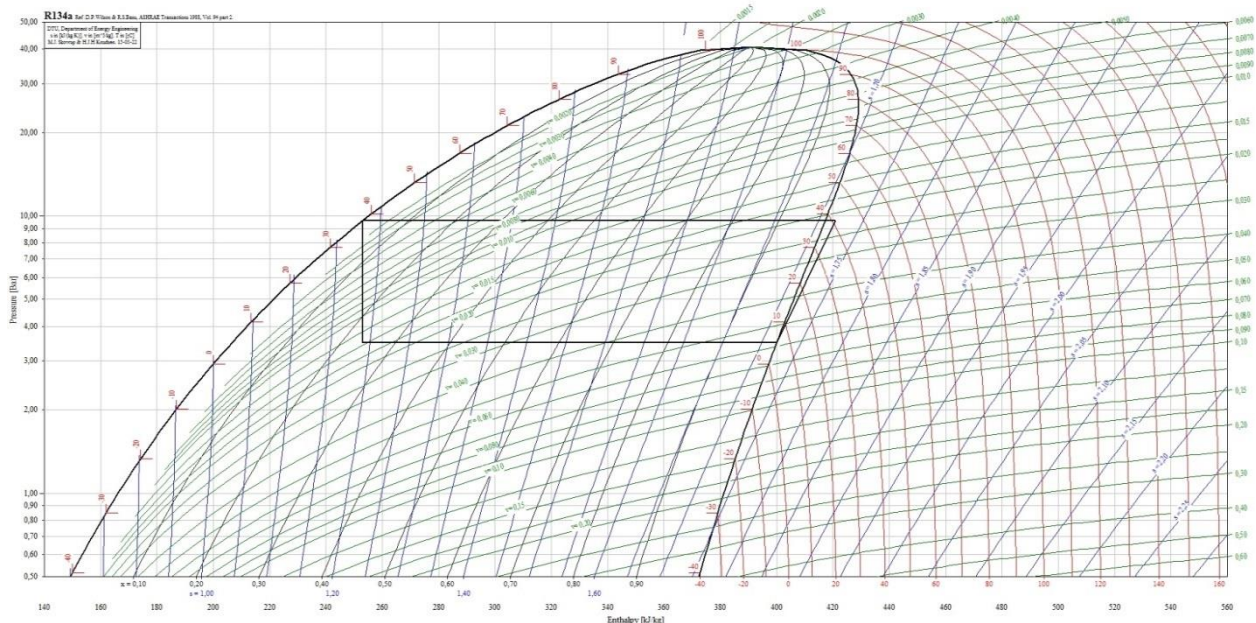
Taškas	T, C <sup>0</sup>	P, bar	v, m <sup>3</sup> /kg	h, kJ/kg	s, kJ/kg K
1	5,00	3,5	0,058	400,07	1,719
2	30,45	7,27	0,029	415,12	1,719
3	28,00	7,27	N/A	238,58	N/A
4	5,00	3,5	0,058	238,58	1,719



2.9 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant budinčiui apkrovimui.

2.4 Lentelė. Taškų parametrai šilumos siurbliui dirbant nominaliu režimu.

Taškas	T, C <sup>0</sup>	P, bar	v, m <sup>3</sup> /kg	h, kJ/kg	s, kJ/kg K
1	2,00	3,15	0,064	398,36	1,721
2	30,84	7,27	0,029	415,58	1,721
3	28,00	7,27	N/D	238,58	N/D
4	2,00	3,15	0,064	238,58	1,721



2.10 pav. Individualaus namo šilumos siurblio ciklas, esant nominaliam apkrovimui.

Garintuvo parenkamasis skaičiavimas tiesiogiai priklauso nuo šilumos perdavimo koeficiento. Dažnai šilumos perdavimo koeficientą tam tikrose intervalų ribose pateikia įvairūs žinynai, tačiau individualiai tam skirtam režimui paskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas yra tikslesnis ir patikimesnis. Kadangi šilumokaitis bus gaminimas individualiai, tikslinga paskaičiuoti ir šilumos perdavimo koeficientą. Kaip minėjau, skaičiavimams atlikti privalu parametrus pasirinkti kuomet ciklas veikia pilnai eksploatuojant sistemą. Dažniausiai tokios sistemos projektuojamos 30-40-čiai metų, todėl privalome įvertinti visus galimus ir numatytus galios poreikius, bei įrangos nusidėvėjimus.

#### 2.4. Garintuvo šiluminiai skaičiavimai

Vienas iš svarbiausių parametru parenkant garintuvą yra jo šiluminiai parametrai ir šilumos perdavimo koeficientas. Jam paskaičiuoti pasinaudosiu Yan ir Lin pateiktomis formulėmis ir išraiškėmis. Šie mokslininkai pateikė koreliaciją [8] šilumos mainų koeficientui gauti, o jų sukurta koreliacija laikoma kaip viena iš tiksliausių ir plačiausiai išbandyta, naudojant šilumnešį – .R134a.

$$\alpha_r = 1.926 \cdot Re_{eq} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{-0.5} \cdot Bo_{eq} \cdot \lambda_L / D_h \quad (2.7)$$

$$Re_{eq} = G_{eq} \cdot D_h / \eta_L \quad (2.8)$$

$$Bo_{eq} = g''_w / (G_{eq} h_{LG}) \quad (2.9)$$

$$Ge_{eq} = G((1 - x_m) + x_m \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.5}) \quad (2.10)$$

$$Re = G D_h / \eta_L \quad (2.11)$$

$$Pr = \eta_L c_p / \lambda_L \quad (2.12)$$

Čia:  $\alpha$  - šilumos perdavimo koeficientas [W/m<sup>2</sup>K].  $G$  masės srautas [kg/m<sup>2</sup>s];  $D_h$  hidraulinis skersmens, apvaliam vamzdžiui vidinis skersmens, [m];  $\eta_L$  klampa skystos fazės [N s/m<sup>2</sup>].  $\lambda_L$  laidumas skystos fazės [W/m K].  $\rho_G$  tankis dujinės fazės [kg/m<sup>3</sup>].  $\rho_L$  - tankis skystos fazės [kg/m<sup>3</sup>].  $x_m$  - vidutinis dujinės fazės kiekis.

Atlikus skaičiavimus Yan ir Lin pateiktomis formulėmis, buvo gauti netikslūs skaičiavimai. Atlikus išsamesnį tyrimą paaiškėjo, kad šie matavimai netinka mano pasirinktai sistemai. Didžiausią įtaką tam darė režimo parametrai, kuriuos pagrinde sąlygoja Lietuvos klimatinės sąlygos. Tuomet teko ieškoti tinkamesnės išraiškos, kuri tenkintų mano užsiduotus parametrus. Tuomet buvo pasinaudota Kandilar pateikta koreliacija, kurios išraiška paskaisčiuojama taip:

$$a = [y1 Co^{y2} E_{CB} + y3 Bo^{y4} F_{fl} E_{NB}] (1 - x)^{y5} \alpha_L^{y6} \quad (2.15)$$

$$Co = \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} ((1 - x)/x)^{0.8} \quad (2.16)$$

Žinant visus reikiamus dydžius, buvo apskaičiuotas šilumos mainų darbo agento virimo dominantės kriterijus, tai paskaičiuota pagal sekančią formulę

$$Bo = \frac{q'}{G h_{LG}} \quad (2.17)$$

$$\alpha_L = 0.2875 Re^{0.78} Pr^{1/3} \frac{\lambda_L}{D_h} \quad (2.18)$$

Kiekvienai iš garintuvo vijų skerspjūvių tenka pusė tekančio darbo agento debito. Pastarasis paskaičiuotas naudojantis 2.18 formulę, apskaičiuoju darbo agento savitąjį debitą:

$$G = \frac{g}{f_{vid}} \quad (2.19)$$

$$a = [y1 Co^{y2} E_{CB} + y3 Bo^{y4} F_{fl} E_{NB}] (1 - x)^{y5} \alpha_L^{y6} = 2916 W/m^2K \quad (2.20)$$

Paskaičiavus šilumos atidavimo koeficientą, iš darbo agento pusės, galima pilnai atlikti ir kitus skaičiavimus bei parinkti Garintuvo konfigūraciją.

## 2.5. Garintuvo skersmens parinkimas

Garintuvo vamzdelio skersmens parinkimas buvo atliekamas pasirenkant varinius vamzdelius, tokiam pasirinkimui didžiausią įtaką darė esamas darbo agentas R134a ir sintetinių tepalų poveikis variui. Aliuminis, kaip vienas iš variantų buvo atmestas, nes sąveikaujant su kai kuriais sintetiniais tepalais dažnai pradeda oksiduotis, oksidacijos metu susidarę dariniai nunešami kartu su srautu, o tai greičiau užkemša filtrą ir didindami slėgio nuostolius. Kadangi sistema projektuojama keliems dešimtmečiams, reikia įvertinti ir eksploatacines išlaidas, bei sumažėjusį šilumos laidumą dėl susidariusių oksidų. Aliuminio šilumos laidumas siekia apie 250 W/m K, kai tuo tarpu aliuminio oksido 30 W/m K, taip mes prarandame apie 80% šilumos laidumo. Nerūdijantis plienas nepasizymi geromis šilumos laidumo savybėmis, lyginant su kitais metalais, jis siekia 201 W/m K.. Taip pat tarp skirtingų metalų derinių gali atsirasti ir elektrolitinė korozija, net ir nerūdijantis plienas pradeda koroduoti atsiradus santykiui su kitu metalu. Tokiu atveju patartina gaminti iš tos pačios medžiagos garintuvą, kaip ir visa sistema, tai dažniausiai šaldymo – šildymo sistemose yra varis. Paskaičiavus šilumos laidumo koeficientą ir reikiamą garintuvo galingumą, reikia parinkti garintuvo ilgį ir skersmenį. Kadangi bus naudojama jau esama akumuliacinė talpa, todėl garintuvo matmenys turėjo būti pritaikyti prie jos matmenų.

Siekiant sumažinti slėgio nuostolius, patartina didinti skersmenį, taip sumažinant šilumokaičio ilgį. Reikia pastebėti, kad labai didelis vamzdžio skersmuo padidina agento dozę sistemoje. Dėl išaugusios agento dozės atsiranda problema, kuomet šilumos siurblio sustojimo metu, 2/3 darbo agento skysta fazė gali susikaupti garintuve. O paleidimo metu į kompresoriaus darbinį tūrį gali patekti skystos fazės darbo agentas. Kadangi skystis yra beveik nespūdas, pilnai užpildęs kompresoriaus darbinį tūrį, gali sulaužyti kompresorių, o jei net ir atlaikius šias susidariusias sąlygas, skystos fazės išmetimas per vožtuvą gali sulaužyti patį vožtuvą. Todėl garintuvą reikia parinkti kuo mažesnio vidinio tūrio ir didelio paviršiaus ploto.

Norint paskaičiuoti savitąjį šilumos srautą, reikia žinoti garintuvo plotą, kuris preliminariai galėtų būti paskaičiuotas pagal pagrindinę šilumos mainų lygtį. Ankstesniame skyriuje buvo paskaičiuotas šilumos atidavimo koeficientas, tolimesniems skaičiavimams priimu reikšmę – 2916 (W/(m<sup>2</sup>·K)). Tuomet preliminarus garintuvo plotas paskaičiuojamas taip:

$$f_v = \frac{Q_0}{k \cdot \Delta t} = \frac{5,52 \cdot 10^3}{2916 \cdot 2} = 0,95, m^2 \quad (2.21)$$

Temperatūrų skirtumas  $\Delta t$  yra paskaičiuojamas tarp įtekančio ir ištekančio vandens iš gruntinio šilumokaičio.

Keičiant vamzdelių skersmenį pradeda kisti ir šilumos atidavimo koeficientas, kadangi masinis debitas išlieka tas pats, tuomet padidėja tekėjimo greitis, padidėja ir šilumos atidavimo koeficientas. Mažinant skersmenį didėja vamzdelio ilgis, nes reikalingas paviršiaus plotas šilumos mainams įvykti, tačiau jis nedidėja proporcingai kaip buvo manyta. Mažinant skersmenį mažėja ir reikiamas paviršiaus plotas. Tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad labai sumažinti skersmens negalima, nes dėl didesnio ilgio bei didesnio kilpų kiekio, didėja ir slėgio nuostoliai. Atlikus skaičiavimus lentelėje bei grafike pateikiama paviršiaus ploto ir skersmens priklausomybės:

2.5 Lentelė. Parametrai.

Nominalus dimetras, mm	Sienelės storis, mm	Vidinis vamzdžio skersmuo, mm	Preliminarus plotas, m <sup>2</sup>	Šilumos perdavimo koeficientas, W/m <sup>2</sup> K	Reikiamas ilgis, m
10	1	8	0,41	10140	6,38
12	1	10	0,64	6820	7,8
15	1	13	0,88	4280	8,3
18	1	16	0,95	2970	9,5
22	1	20	1,74	1589	13,85
28	1	26	2,19	1260	13,41
35	1,5	32	3,13	880	15,57
40	1,5	37	4,06	680	17,47

Įvertinus akumuliacinės talpos matmenis ir turimą įrangą, buvo nuspręsta grąintuvą gaminti iš vamzdelio, kurio išorinis skersmuo yra 18 mm, o vidinis 16 mm. Mūsų reikiamam grąintuvui pagaminti prireiks 9.5 metro vamzdžio. Žinant šiuos parametrus galima paskaičiuoti išorinį vijos paviršiaus plotą:

$$f_{is} = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot l = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.018 \cdot 9.5 = 1.07 \quad (2.22)$$

$$q_w = \frac{Q_0}{f_v} = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot l} = \frac{5520}{0.95} = 5810,53 \text{ W/m}^2 \quad (2.23)$$

Šis dydis apskaičiuotas tokiam režimui, kai garintuvas dirbs maksimaliu galingumu, t.y. esant ekstramaliai žemai aplinkos temperatūrai, taip užtikrindamas optimaliausią veikimą. Norint suskaičiuoti virimo dominantės kriterijų, be savitojo šilumos srauto reikšmės, reikia apskaičiuoti dar ir darbo agento savitosios šilumos bei savitojo debito reikšmes. Darbo agento savitosios šilumos reikšmė randama pasinaudojant CoolPack programa. Ji lygi entalpijų tarp sočiųjų garų ir sotaus skysčio skirtumui prie (-3) °C virimo temperatūros.

$$f_{vid} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.01^2}{4} = 7.85 \cdot 10^{-5}, m^2 \quad (2.24)$$

Taip pat reikėtų įvertinti, kad šilumos siurblys gali veikti pilnu apkrovimu kelias dienas be perstojo, kuomet gręžinys nespėja regeneruotis ir garavimo temperatūra nukrenta žemiau 0°C. Todėl ir buvo pasirinkti tokios žemos virimo temperatūros. Visi šie duomenys buvo pastebėti per pirmus eksploatacijos metus atliekant eksperimentinius matavimus ir stebėjimus.

## 2.6. Dvifazio srauto slėgio nuostoliai garintuve.

Bendri slėgio nuostoliai garintuve skaičiuojami paprastai, įvertinant kelis pagrindinius parametrus. Skaičiavimai atliekami su homogeniniu mišiniu, tai atlikti galima pasitelkus šią išraišką:

$$\Delta P_{BP} = \left[ f_{BP} \frac{(x_{out} - x_{in})}{x L} \right] \frac{G^2 x v_g L}{D} \quad (2.25)$$

Ši išraiška tinka daugumai pagrindinių darbo agentų ir yra universali skaičiuojant nuostolius, tačiau ji buvo perskaičiuota [7] ir pritaikyta R134a. Taip pat skaičiavimas atliekamas ir su dvifaziu srautu, koreliacija paskaičiuojama darbo agentui taip:

$$\Delta P_{tp} = \Delta P_{trint} + \Delta P_{pagre} = \left[ \frac{f_N L (v_{out} - v_{in})}{D_H} + (v_{out} - v_{in}) \right] G^2 \quad (2.26)$$

Naujasis dvifazio srauto trinties koeficientas apskaičiuojamas taip:

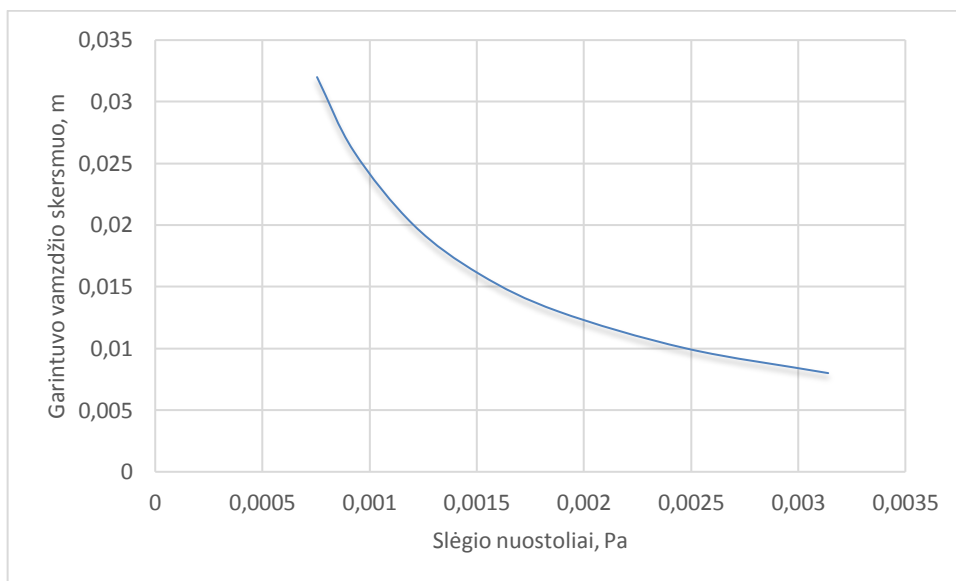
$$f_N = 0,00506 Re_{fo}^{-0,0951} K_f^{0,1554} \quad (2.27)$$

$$Re_{fo} = \frac{GD_H}{\mu_f} \quad (2.28)$$

$$K_f = \frac{\Delta_x h_{fg}}{Lg} \quad (2.29)$$

Čia:  $D_H$ -hidraulinis skersmuo [m];  $L$ -šilumokaičio ilgis [m];  $v_{out}$  dvifazio mišinio specifinis tūris garintuvo išėjime;  $v_{in}$  dvifazio mišinio specifinis tūris garintuvo įėjime;  $G$ -masinis debitas [kg/s];  $\Delta x$  skirtumas garų dalies tarp įėjimo ir išėjimo;  $\mu_f$  dvifazio srauto dinaminė klampa [N/m s];  $h_{fg}$  entalpijų skirtumas prieš garintuvą ir po [kJ/kg];  $\Delta P_{tp}$ -slėgio nuostoliai garintuve [Pa];  $\Delta P_{trint}$  slėgio nuostoliai dėl trinties susienele [Pa];  $\Delta P_{pagre}$  slėgio nuostoliai dėl pagreičio [Pa].

Kaip ir visi skaičiavimai šis atliekamas esant maksimaliam garintuvo apkrovimui, todėl išraiškos buvo pasirinktos esant didžiausiam temperatūrų skirtumui. Slėgio nuostoliai labiausiai kinta nuo vidinio vamzdžio skersmens ir ilgio. Todėl pateikiu grafiką, kuris nurodo slėgio nuostolių priklausomybę nuo garintuvo vidinio skersmens.



2.11 pav. Slėgio nuostoliai ir priklausomybė nuo skersmens.

Grafike atsispindi priklausomybė, kaip didėjant hidrauliniam skersmeniui mažėja nuostoliai. Tačiau labai išdidinti vamzdžio skersmens neleidžia prieš tai minėtos problemos. Pasirinkto skersmens garintuvas sukurs nedidelį 0,016 Pa slėgio nuostolį. Pasirinkto skersmens vamzdis šiuo atveju yra optimaliausias.

Atlikus slėgio nuostolių skaičiavimus tiesiam vamzdžiui privalu įvertinti ir vietinių kliūčių sukuriamus slėgių nuostolius. Tai atliekama pasirenkant konkretų kliūtis tipą ir vamzdžio skersmenį, bei jį išreiškiant vamzdžio ilgio vieneto ekvivalentu. Kadangi mus riboja talpos matmenys, todėl gyvatukas yra suvirintas iš vamzdžių segmentų ir alkūnių. Papildomai suvirinti tokį šilumokaitį prireiks 16 alkūnių. Pasinaudojus [30] pateikiama lentelė, skirta perskaičiavimui, kiekviena alkūnė papildomai sukurs apie 0,305 m papildomą ilgį. Pasitelkus ta pačia formule (2.29) apskaičiuojamas slėgio nuostolius garintuve, kuris padidės iki 0.018 Pa.

## 2.7. Šiluminiai mainai akumuliacinėje talpoje

Šilumos mainai vandens pusėje privalo būti lygūs arba didesni už šilumos mainus darbo agento pusėje. Vandens pusėje esantys mainai paskaičiuojami paprasčiau, juos paskaičiuoti galima pasitelkus formulę:

$$q = h_c A dT \quad (2.30)$$

Pasinaudojus (2.30) formule galima išsireikšti  $h_c$  kuris gaunamas:

$$h_c = \frac{6223}{1.6} = 1037,2 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (2.31)$$

Čia:  $q$ -šilumos [w];  $h_c$ - Šilumos perdavimo koeficientas [W/m<sup>2</sup> K];  $A$ -paviršiaus plotas [m<sup>2</sup>];  $dT$  – temperatūrų skirtumas;

Temperatūrų skirtumas priklauso nuo šilumos mainų tarp vandens ir darbo agento, įvertinant visus kriterijus mažinančius ir didinančius šilumos mainus garintuvo viduje ir išorėje.

$$\Delta t = \frac{Q}{kF} \quad (2.32)$$

Pasinaudojus 2.32 formule gauname, kad šilumos mainai iš vandens pusės yra beveik 3 kartus mažesni lyginant su mainais iš darbo agento pusės. Todėl reikia 3 kartus padidinti paviršiaus plotą ir tai padaryti nedidinant vidinio tūrio. Tai padaryti yra įmanoma keliais būdais:

- Padidintais paviršiaus ploto vamzdžiais;
- Papildomų plokštelių dėjimu;
- Išoriniu briaunavimu.

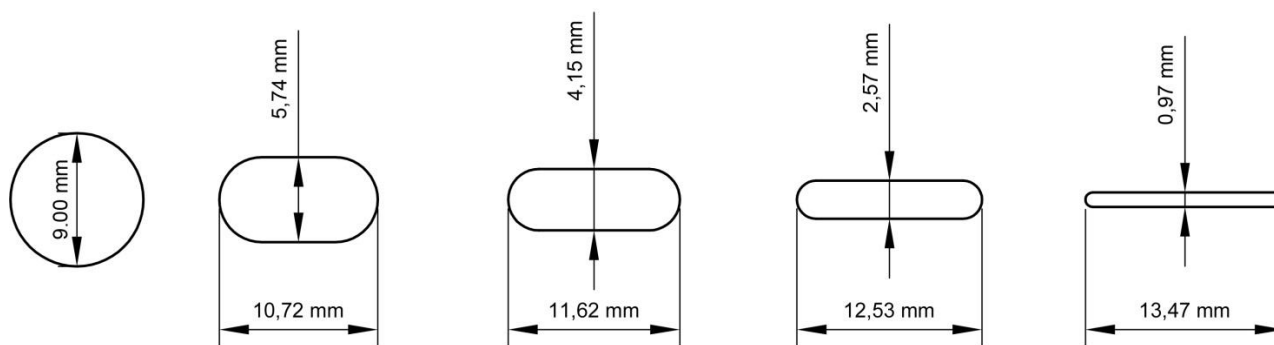
Iš pateiktų variantų buvo pasirinktas, vienintelis būdas, tenkinantis mūsų atvejį, garintuvo briaunavimas iš išorės. Pasirinkimui darė įtaka racionaliausias medžiagų panaudojimas ir patogiausias surinkimas ir šis būdas yra atsparus paviršiaus apšalimui. Briaunavimui buvo pasirinkta varinė viela, kuri sukama aplink vamzdį, taip didinant paviršiaus plotą. Briaunavimui buvo pasirinkta 3,5mm varinė viela.

## 2.8. Garintuvo vamzdžio modifikacija

Paskaičiavus ir parinkus optimaliausią vamzdžio skersmenį ir ilgį, buvo pastebėta ir daugiau tobulinimo galimybių, taip optimizuojant garintuvo veikimą. Olandų ir Jungtinių Amerikos Valstijų mokslininkai (2003 m.) atliko bandymus [6] su keliais skirtingų formų, tačiau vienodo paviršiaus ploto, suplotais vamzdžiais, panaudojant juos garintuvų ir kondensatorių



šilumokaičių gamyboje. Mokslinio tyrimo ir bandymo tikslas buvo išsiaiškinti, kokią įtaką slėgio nuostoliams, šilumos perdavimui ir trinčiai daro įvairios formos modifikacijos. Jie atliko bandymą su 9 mm vamzdžiu, kuris buvo suplotas į kelis skirtingus bandinius, o suplotų bandinių paviršiaus plotas liko nepakitęs. Tyrimo metu atlikus matavimus buvo pastebėta, kad dėl suplojimo sumažėjo vamzdžio hidraulinis skersmuo bei pasikeitė dauguma šiluminių parametrų. Suploti buvo 4 bandiniai, su kuriais buvo atliekami matavimai, po to gauti rezultatai lyginami su apvaliu vamzdžiu.



2.12 pav. Suplotų vamzdelių bandiniai.

Bandymų rezultatai parodė kuomet vamzdelių skerspjūvis sumažėja per pusę, garų greitis padidėjo dvigubai, kuris keturis kartus padidino garų kinetinę energiją. Dėl padidėjusios kinetinės energijos padidėjo ir šlities modulis tarp skysto ir garinių fazių sluoksnių, dėl to skerspjūvyje mažėjo skystos fazės kiekis, kuris ir sumažina masinį tūrį vamzdyje.

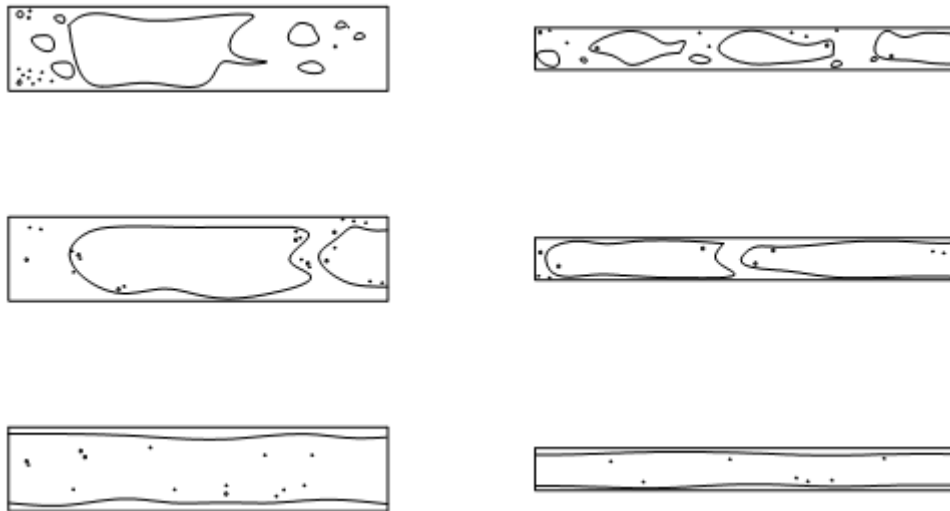
Pateiktomis formulėmis (2.33) ir (2.34) paskaičiavus, gaunamas 40% mažesnis slėgio kritimas, tačiau atlikus eksperimentinius matavimus, buvo gauti mažesnės reikšmės, tik apie 20%.

$$\frac{dP}{dz} = \phi_l^2 \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (2.33)$$

Skaičiavimai atliekami su dalinėmis išvestinėmis iš suplojimo storių.

$$\phi_l = 1,376 + c_1 X_{tt}^{-c_2} \quad (2.34)$$

Šilumos perdavimo matavimai buvo atliekami kiekvienu atveju ir lyginami su apvaliu vamzdeliu. Palyginimas buvo atliekamas esant toms pačioms sąlygoms, t. y. 35°C, bei prie vienodo masinio debito. Prieš atliekant bandymus, buvo atlikti skaičiavimai ir buvo gautas 20%-30% didesnis šilumos perdavimo koeficientas. Atlikus matavimus ir palyginus su paskaičiuotais, buvo gauti panašūs rezultatai. Toks šilumos mainų ir slėgio nuostolių sumažėjimas atsispindi ir dvifazio srauto virsmuose, kurie pateikiami paveikslėlyje:



2.13 pav. Dvifaziai srautai skirtinguose vamzdžiuose.

Kairėje paveikslėlio pusėje pateikta apvaliame vamzdelyje vykstantys dvifaziai virsmai, o dešinėje pusėje pateikta suplotame vamzdelyje vykstantys dvifaziai virsmai. Virsmai pateikti tuose pačiuose atstumuose palyginti, kaip matosi esant suplotame vamzdyje skystos fazės procentaliai yra mažiau.

Tačiau ši modifikacija buvo nepritaikyta dėl papildomo išorinio sluoksnio briaunavimo. Atlikus kelis eksperimentinius, nedidelio ilgio garintuvo, suplojimo bandymus buvo susidurta su keliomis problemomis. Kadangi šilumokaitis buvo gaminamas individualiai, buvo sunku išlaikyti vienodą vamzdžio aukštį, turint tokį ilgį. Taip pat spaudimo metu atsirado aštrių įkirtimo kampų, tačiau pagrindinė priežastis dėl kurios nebuvo atlikta ši modifikacija, tai prastas kontakto užtikrinimas tarp vamzdžio ir briaunos.

### 3. GARINTUVO ANALIZĖ

#### 3.1. Šilumos mainai

Ankstesniame skyriuje buvo paskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientą darbo agento pusėje. Norint užtikrinti gerus šilumos mainus ir pilnai išnaudoti garintuvą, privalu gauti gerus šilumos mainus ir vandens pusėje. Tuo tikslu buvo paskaičiuotas šilumos laidumo koeficientas iš vandens pusės, kuris siekė 1037,2 W/m<sup>2</sup> K. Esant natūraliai konvekcijai temperatūrinis plėtimosi koeficientas  $\beta$  nagrinėjamų temperatūrų diapazone yra labai mažas. Nuselto (Nu) kriterijumi išreiškiamas šilumos mainų intensyvumo padidėjimas dėl konvekcijos. Horizontaliam cilindriniam vamzdžiui esant natūraliai konvekcijai šilumos mainų intensyvumas skaičiuojamas pasitelkus šią formulę:

$$Nu_D = 0,36 + \frac{0,518 Re_D^{1/4}}{[1 + (\frac{0,559}{Pr})^{16}]^{4/9}} \quad (3.1)$$

Tačiau norint padidinti šilumos mainus vandens pusėje, reikia didinant ir Renoldso skaičių.

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad (3.2)$$

Reinoldso kriterijaus priklausomybė apskaičiuojama kuomet vanduo apiplauna tam tikro skersmens vamzdį, išraiška patikslinama įvedant papildomų kintamųjų, tuomet formulė atrodo taip:

$$Re_D = \frac{g(\frac{\Delta T}{T_\infty})D^3}{\nu a} \quad (3.3)$$

Čia:  $g$ -laisvojo kritimo pagreitis [m/s<sup>2</sup>];  $T_\infty$ -aplink esančio vandens temperatūra [°C];  $D$ -vamzdžio skersmuo [m];  $\Delta T$ -temperatūrų skirtumas tarp vandens ir šilumokaičio [°C];  $a$ -terminis difuzijos koeficientas [m<sup>2</sup>/s];  $\nu$ -kinematinė klampa [m<sup>2</sup>/s].

Nuselto kriterijaus skaičiavimams (3.1) formulė tinka tuomet, kai turime laminarinį tekėjimą, tačiau prasidėjus turbuliantiniam tekėjimui, išraiška pasikeičia taip:

$$Nu_D = (0,60 + 0,387 \left( \frac{Re_D}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{16} \right]^{1/9}} \right)^{1/6})^2 \quad (3.4)$$

3.6 Lentelė Garintuvo savybės.

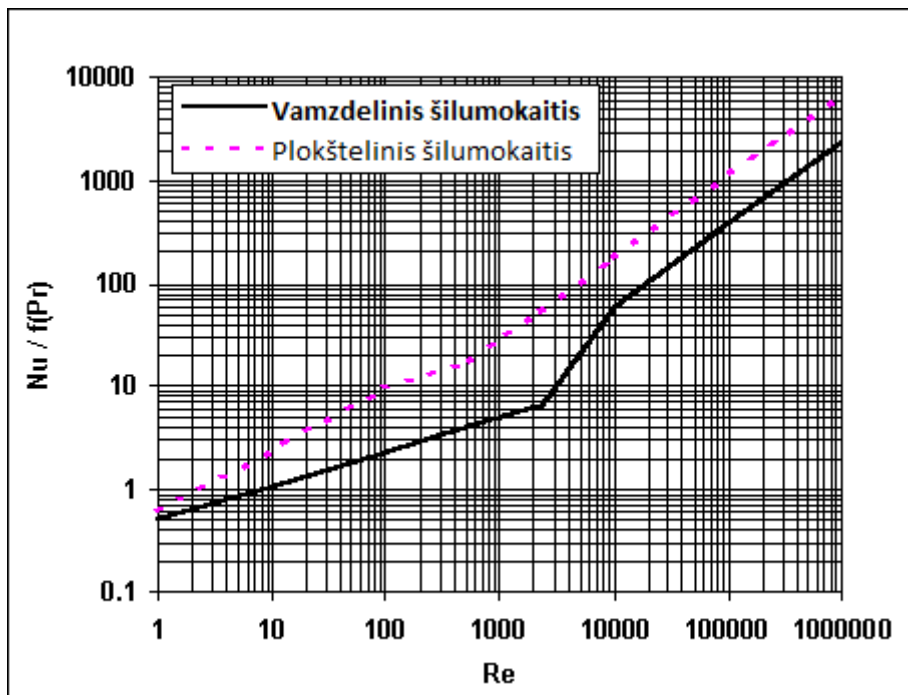
Vamzdžio skersmuo, mm	Vamzdžio skersmuo, m	Nu <sub>D</sub>	Re <sub>D</sub>
10	0,01	5,012	19930
12	0,012	5,694	34440
15	0,015	6,666	67260
18	0,018	7,589	116200
22	0,022	8,764	212200
28	0,028	10,43	437500
35	0,035	12,265	854500

Pagerinti šilumos mainus iš vandens pusės, ir užtikrinti turbulentinį tekėjimą tikslinga tik nedideliame tūryje aplink garintuvą, tokiu atveju privalu sumontuoti papildomą konstrukciją garintuvui, kuri jį laikytu talpos paviršiuje. O atitekantis šilumnešis iš gruntinio šilumokaičio apiplautų tik patį garintuvą ir tik po to susimaišo su akumuliacinės talpos fluidu. Visos talpos (0.3 m<sup>3</sup>) vandens intensyvus maišymas yra neefektyvus ir neekonomiškas, todėl buvo nuspręsta ieškoti alternatyvių būdų.

### 3.1. Briaunos efektyvumo skaičiavimas

Daugybė mokslinių tyrimų [18] ir praktinė patirtis įrodė, kad optimaliausias ir efektyviausias briaunavimas yra tuomet, kai vamzdis apbriaunojamas paliekant tarpus tarp vijų lygius pačios briaunos storiui. Tai yra kai briaunos storis  $\leq$  tarpui tarp briaunų. Taip pat buvo įrodyta, kad briaunavimas nėra efektyvus esant natūraliai konvekcijai ar esant laminariniam tekėjimui. Norint gauti geriausią rezultatą, privalu srautą priversti tekėti turbulentiškai. Dideliame plote tai padaryti yra sudėtingiau ir reikalauja didesnių išlaidų cirkuliaciniam siurbliui ar papildomiems vidiniams vandens maišytuvams. Todėl buvo nuspręsta padaryti konstrukcija kuomet garintuvai yra patalpinami nedidelėje tarpinėje talpoje ir tik jį apiplauna iš gruntinio šilumokaičio atitekantis šilumnešis.

Tuomet buvo atlikti palyginamieji skaičiavimai tarp esamo ir naujai projektuojamo garintuvų. Skaičiavimus patogiau buvo išreikšti standartine išraiška: Reinoldso kriterijau priklausomybė nuo Nuselto.



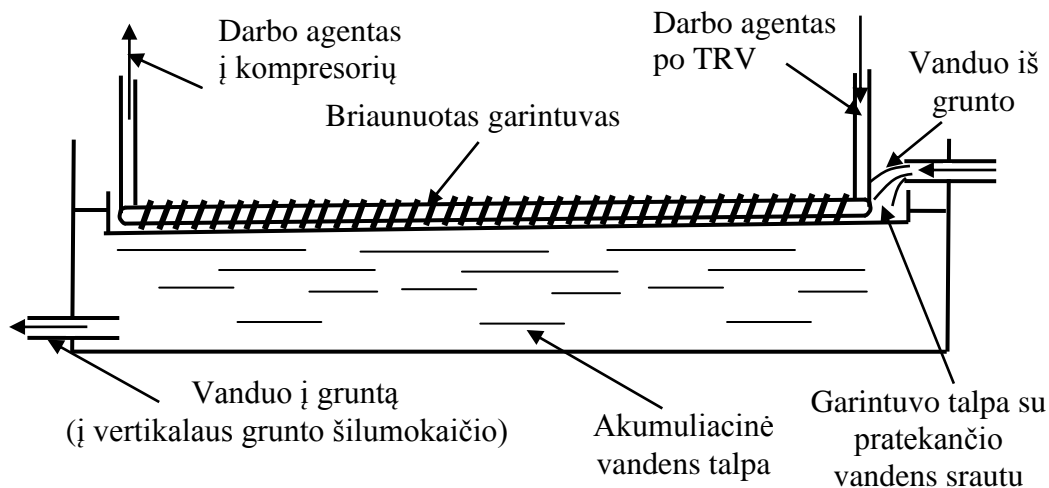
### 3. 14 pav. Briaunavimo šilumos manai

Šiame grafike geriausiai matosi, kada srautas pereina iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį, šilumos mainų intensyvumo padidėjimas išauga 60% ir proporcingai didėja, didinant tekėjimo greitį. Kai tuo tarpu plokšteliniam garintuvui reikėjo mažesnio tekėjimo greičio ir užteko bendro maišymosi talpoje. Šis grafikas tik įrodo papildomos konstrukcijos įrengimo naudą ir reikalingumą.

Taip pat buvo įrodyta, kad toks didelis paviršiaus briaunavimas, kuomet tarpas tarp lygus briaunos aukščiui, yra neracionalus mūsų atveju, kadangi mes nebeužtikriname gerų mainų iš darbo agento pusės. Tokiu atveju neracionaliai panaudojamos medžiagos ir išauga garintuvo gamybos kaina. Todėl buvo padidintas tarpas tarp briaunų apie 1.5 karto. Toks tarpas pilnai užtikrina šilumos mainus tarp talpoje esančio propilenglikolio ir garintuvo.

#### 3.1. Garintuvo montavimas

Norint užtikrinti geresniu šilumos mainus iš vandens pusės reikia padidinti vandens tekėjimo greitį. Padidinti vandens greitį visoje 0.3 m<sup>3</sup> talpoje yra neekonomiška, todėl naujasis briaunotas garintuvas yra įtaisomas kartu su papildoma pertvara, o visa tai sumontuojama viršutiniame vandens lygyje pagrindinėje akumuliacinėje talpoje kaip pavaizduota paveikslėlyje:



3. 15 pav. Garintuvo talpa su pratekančiu vandens srautu.

Didesnioji – akumuliacinė vandens talpa (apatinė dalis) skirta šilumos kaupimo sistemai realizuoti, ir daugiau skirta vasaros laikotarpiui. Tačiau pagrindiniai šilumos mainai vyksta aplink garintuvą, viršutiniame sluoksnyje. Tačiau kaip buvo minėta svarbiausias mainų vandens pusėje efektyvumo faktorius – vandens tekėjimo greitis aplink garintuvą. Akumuliacinės talpos plotis yra 0,5 m, o aukštis turėtų būti toks, kad pratekantis vandens srautas pilnai užsemtų garintuvą. Garintuvo su briaunomis aukštis yra 22 mm, tačiau dėl vamzdžių bei pačios talpos nelygumų, parenkamas 25 mm aukštis. Atmetę pratekėjimo skerspjūvio plotą, kurį užima pats garintuvas ir priėmę, kad cirkuliacinio siurblio našumas 0,45 kg/s (0,00045 m<sup>3</sup>/s) gauname, kad vandens tekėjimo greitis, kuriuo vanduo apiplauna garintuvą yra 0,05 m/s.

### 3.2. Šilumos nuostoliai garintuve

Šilumos nuostoliai skaičiuojami kompleksiskai iš abiejų darbinių pusių, kuomet įvertinami šilumos laidumo koeficientai iš darbo agento ir vandens pusių. Temperatūra garintuve priklauso ne tik nuo grunto ir aplinkos temperatūrų, bet ir nuo pasirinkto režimo pobūdžio, todėl tolimesniuose skaičiavimuose priimama, kad šilumos siurblys veikia maksimaliu apkrovimu. Tuomet termodinaminiai nuostoliai garintuve dėl nepilnų mainų skaičiuojami taip:

$$Q = kF\Delta t \quad (3.6)$$

$$kF = \frac{1}{\frac{1}{a_v f_v} + \frac{\delta}{\lambda f_{vid}} + \frac{1}{a_a f_a}} \quad (3.7)$$

Čia:  $a_v$  šilumos perdavimo koeficientas iš vidinės pusės [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ];  $a_a$  šilumos perdavimo koeficientas iš išorinės pusės [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ];  $\lambda$  vario laidumo koeficientas [ $\text{W/mK}$ ];  $\delta$ -sienelės storis [ $\text{m}$ ].

Tačiau esant realiam ciklui ir veikimui, privalu įvertinti visus kintamuosius bei faktorius. Privalu įvertinti paviršių apnašų įtaką šilumos mainams, iš agento pusės tepalo sluoksnį, o iš vandens – kalkes bei nešvarumus. Todėl formulė 3.7 turi būti perskaičiuota įvertinus papildomus kintamuosius:

$$kF = \frac{1}{\frac{1}{a_v f_v} + \frac{r_v}{f_v} + \frac{\delta}{\lambda f_{vid}} + \frac{r_a}{f_a} + \frac{1}{a_a f_a}} \quad (3.8)$$

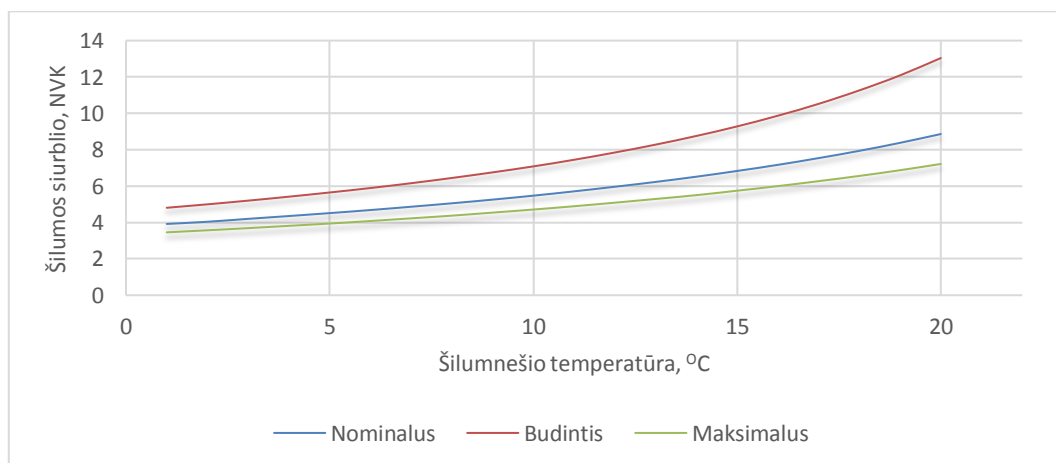
Dėl nedidelio sienelės storio bei gero vario šilumos laidumo, sienelės įtaka pasidaro nykstamai maža, todėl šių kriterijų galime ir nevertinti, todėl formulę galime išreikšti sekančiai:

$$kF = \frac{1}{\frac{1}{a_v f_v} + \frac{r_v}{f_v} + \frac{r_a}{f_a} + \frac{1}{a_a f_a}} \quad (3.9)$$

Paskaičiavus gauname, kad  $kF = 1493 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kiekvienam iš trijų šilumos siurblio veikimo režimui kinta šiluminiai parametrai, taip pat kinta ir grunto temperatūra, skiriasi ir temperatūrų skirtumas kuris apskaičiuojamas taip:

$$\Delta t = \frac{5500}{893} = 6,16 \text{ K} \quad (3.10)$$

Kiekvienam šilumos siurblio veikimo režimui yra priskiriamos ir skirtingos temperatūros, dėl to kinta ir šilumos siurblio naudingumas. Tačiau didžiausią šilumos siurblio veikimui įtaką daro grunto temperatūra, o tiksliau iš jo grįžtančio šilumnešio temperatūra. O visa tai galima išreikšti priklausomybe:

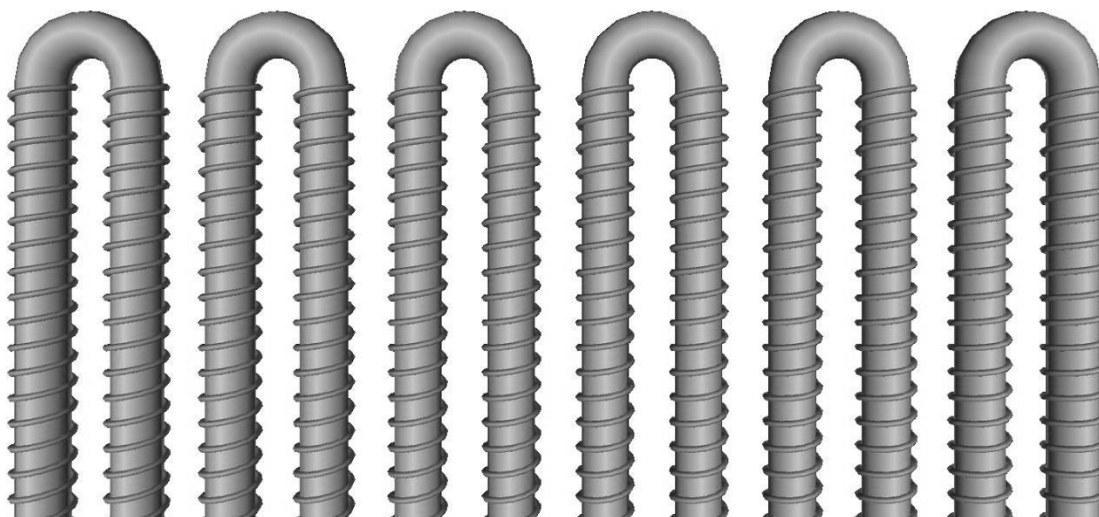


3. 16 pav. Rėžimų naudingo veiksmo koeficiento kitimas nuo šilumnešio temperatūros.

Grafike gerai matosi kaip kinta šilumos siurblio naudingo veiksmo priklausomybė nuo iš grunto grįžtamos temperatūros. Geriausi rezultatai gaunami kuomet iš grunto grįžta maksimali temperatūra, o šilumos siurblys veikia budinčiu režimu, tokios sąlygos susidaro tuomet kai prasideda pirmosios šalnos. Tai įvyksta dar neprasidėjus šildymo sezonui, tačiau atsiradus šildymo poreikiui naudingumas staigiai mažėja, nes gruntas pradamas intensyviau aušinti. Todėl privalu sukaupti didesnius šilumos kiekius grunte, tuomet ilgesnį laiko tarpą galima turėti teigiamas temperatūras grunte ir gerą šilumos siurblio naudingumą.

#### 4. GARINTUVO GAMYBOS TECHNOLOGIJA

Garintuvo surinkimo geometrijai didžiausia įtaka darė akumuliacinės talpos matmenys. Visas vamzdžio ilgis buvo padalintas į 10 lygių vamzdelių, tarpusavyje suvirint ir sujungiant varinėmis alkūnėmis. Vientisas vamzdžio lankstymas yra patikimesnis, sandarumo ir kokybės atžvilgiu, taip pat sumažinami slėgio nuostoliai dėl vietinių kliūčių. Pasinaudojus lenkimu, dėl didelio radiuso, galima gauti apie 40-50% mažesnius slėgio nuostolius, lyginant su virinta alkūne. Tačiau šitoks lankstymas šiuo atveju nėra tinkamas, didesnio radiuso lenkimai labai išplatina garintuvo plotą. Taip pat susiduriamas su garintuvo ploto didinimo problema. Taip pat ant išlankstyto garintuvo tampa nebeįmanomas papildomas briaunavimas. Todėl ir buvo pasirinktas toks variantas, virinant.



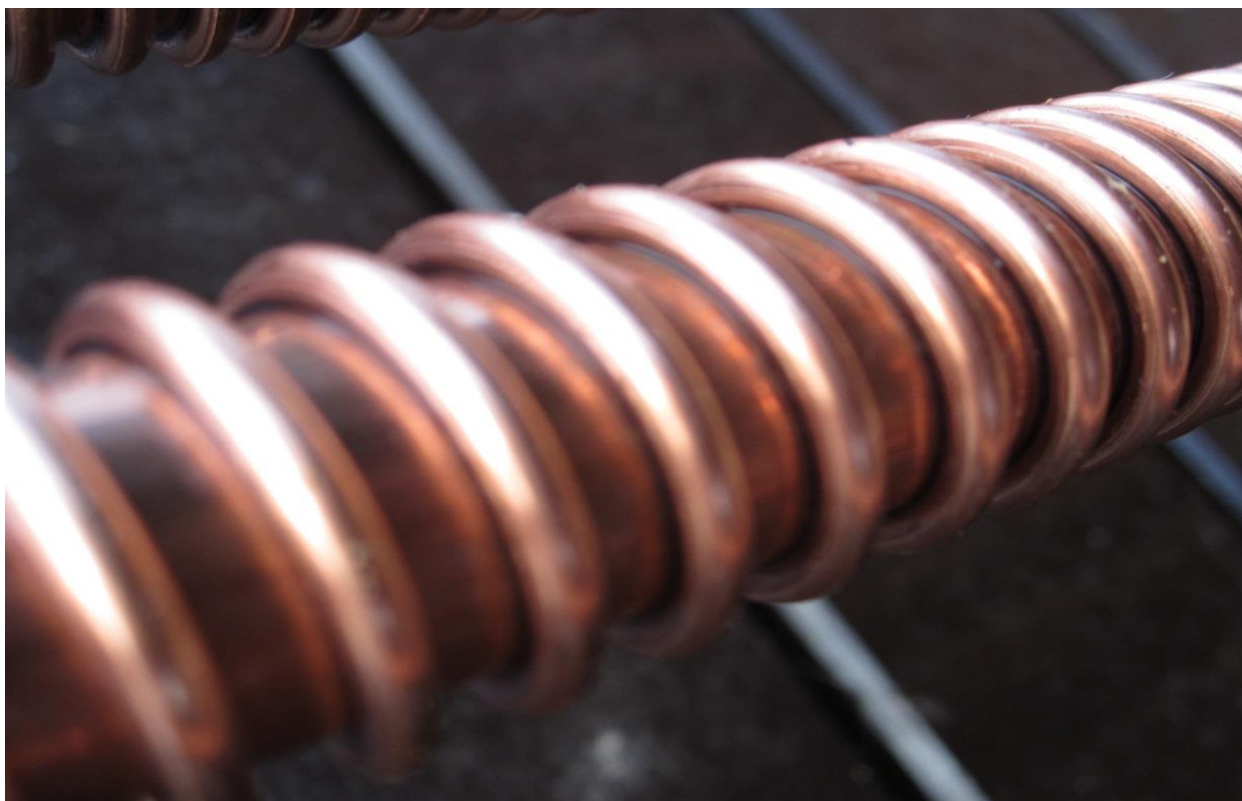
4.17 pav. Naujo garintuvo koncepcija.

Prieš virinimo darbus vyko daug ir paruošiamųjų darbų. Pirmiausia buvo pasiruošta viela, kuri buvo iš anksto susukta į 10 lygių ritinėlių po 20 metrų. Sukimas vyko aplink vienu milimetru mažesnio skersmens vamzdį, lyginant su garintuvo vamzdžiu, tokiu būdu užmautas ritinėlis



standžiau prispaudė prie vamzdelio. Sukimas vyko pasinaudojus tekimo staklėmis, įtvirtinus ruošinį ant jo sukama viela, kuri dar papildomai įtempama.

Svarbiausias ir sudėtingiausias uždavimas su kuria susiduriama gaminant tokio tipo šilumokaičius, yra užtikrinti gerą kontaktą tarp vamzdžio ir apvyniotos vielos. Ritinėliai buvo maunami atskirai ant vamzdžio, sumovus vijos paskleidžiamos per visą ilgį vienodais tarpais tarpusavyje. Tarpas tarp vijų buvo 1.5 karto didesnis nei vielos storis. Geram kontaktui užtikrinti buvo pasirinkta vamzdį padengti specialia kapiliarine pasta. Kuri molekuliniam lygmenyje įsiskverbia į vamzdžio nano nelygumus, taip užtikrinamas 100% kontaktas. Kai tuo tarpu kontaktas be jos yra tik 25-30%. Vienintelis šios kapiliarinės pastos minusas, kad jis neužtikrina metalinio kontakto, tačiau tokio patikimumo pilnai užtenka tokiai sistemai. Tokiu būdu nereikia perkaitinti didelio vamzdžio paviršiaus. Atlikus darbus vielos ir vamzdžio, suvirinimo kontaktas atrodė kaip pavaizduota paveikslėlyje:



4.18 pav. Suvirintas sulituotas tarp vielos ir vamzdžio.

Atlikus visus vielos suvirinimo darbus, atliekami garintuvo surinkimo darbai bei virinamos alkūnės ir pajungimai. Taip pat po šių darbų buvo atliktas hidraulinis šilumokaičio testas. Testavimas buvo atliekamas iškūmavus visą sistemą, o po to užpildžius azotu, ši medžiaga buvo pasirinkta dėl savo savybių, nes nesukelia oksidacijos. Taip mes išvengėm vamzdžio kontakto su oru ir drėgme bei galimu vidiniu oksidacijos žininių ir pažeidimų. Atlikus bandymus nebuvo

pastebėta jokių pratekėjimų, tuomet sekė vakuumavimas, užpildymas R134a ir paleidimas. Surinkus ir įmontavus garintuvą į akumuliacinę talpą, sistema atrodė taip:



4.19 pav. Surinktas garintuvas ir patalpintas akumuliacinėje talpoje.

Kadangi garintuvas buvo gaminamas individualiai ir vienetinis, todėl buvo naudojamas varinis vamzdis ir tokia gamybos technologija. Tačiau norint pradėti tokio garintuvo masinę gamybą šis būdas yra netinkamas, dėl didelių išlaidų ir kainos. Masiniai gamybai toks šilumokaitis turėtų būti gaminamas iš anglinio plieno, kaip ir briaunavimo viela. Plieninė viela kaip ir mūsų atveju privaloma susukti ir užtempti ant plieninio vamzdžio tokiu pat žingsniu. Po pilno surinkimo privaloma tokį šilumokaitį cinkuoti, siekiant užtikrinti apsaugą nuo vandens poveikio ir korozijos. Tokio pramoniniu būdu pagaminto plieninio garintuvo šilumos atidavimo koeficientas bus mažesnis, nei varinio tačiau jis bus apie 5-6 kartus pigesnis, nors laidumas mažesnis tik 20%. Net ir įvertinus, kad šilumokaitis bus gaminamas pramoniniu būdu, jo konstrukcija pailgės iki 20-30 % lyginant su variniu.

Surinkimo ir montavimo darbai buvo atliekami pasibaigus šildymo sezonui, vasaros laikotarpiu. Atlikus pirminius matavimus ir testus, nebuvo pastebėta jokių neatitikimų. Buvo atlikti visi reikiami matavimai ir testai kurie atitiko visus atliktus skaičiavimus. Atėjus šildymo sezonui

sistema su garintuvu buvo pilnai išbandyta ir testuota. Bandymai buvo atliekami su visais trimis veikimo režimais, bei įvairiomis lauko ir vidaus temperatūromis. Net ir esant šalčio atakoms šilumos siurblys veikė nepriekaištingai. Namų patalpose visą laiką buvo palaikomos higienos normos atitinkančios sąlygos. Todėl buvo padaryta išvada, kad ši modifikacija pilnai atitiko keltus reikalavimus ir yra pilnai paruošta naujam bandymui su vandeniu, kuomet bus stebimas vandens poveikis ir apšalimo kiekis.

## 5. VASAROS ŠILUMOS AKUMULIACIJA GRUNTE

### 5.1. Šilumos siurblio eksploatacija

Lietuvoje šios technologijos plėtra akivaizdi, ypač individualių namų šildymui. Tačiau čia kryptama link pigiausio varianto – orinių (žemo potencialo šiluma – aplinkos oras) šilumos siurblių, kuriuos uoliai reklamuoja tokių siurblių prekeivai, panaudodami bazinę reklamą tose šalyse, kuriose jie tinka ir pasiteisina. Tai pietiniai ir vakariniai Europos kraštai, kur žiemos švelnios, o dangaus skliautas žiemą spinduliuoja teigiamą temperatūrą net nešviečiant Saulei. Tuomet gerai šilumą absorbuojantys vakuuminiai kolektoriai kurie pagerina šilumos siurblio efektyvumą. Tuomet privalu pasirinkti sistemą su santykinai didesniu šiluminiu potencialu, tam gerai tinka geoterminis šildymas. Šilumos siurblys su vertikaliu gręžiniu, skirtu žemo potencialo šilumai gauti, yra labiau pritaikytas vėsesnio klimato šalims. Šioms šalims galima priskirti centrinę ir šiaurės Europą, o sistemos su horizontaliu šilumokaičiu labiau pritaikytos šiltesnio klimato šalims, nors plačiai naudojamas ir Lietuvoje. Horizontalus šilumokaitis paklojamas žemės gylyje, kuriame temperatūra tiesiogiai priklauso nuo tiesioginių saulės spindulių ir menkai priklauso nuo geoterminių žemės savybių. Eksploatuojant tokį šilumokaitį vasaros metu, sukaupiamas didelis energijos kiekis paviršiniame grunte, o žiemą visa tai atšaldoma, taip pasiekiamas didelis temperatūrų skirtumas per trumpą laiką. Grunte vyksta dideli temperatūrų svyravimai vasaros bei žiemos periodais.

Vertikalus šilumokaitis yra inertiškesnis ir labiau pritaikytas šaltesnio klimato zonoms, kuomet saulėtų dienų yra mažiau, o natūraliai įšalusį žemė išbūna nemažą laiko tarpą. Lyginant šiuos du tipus, vertikalusis šilumokaitis pasižymi didesnėmis investicijomis bei sistemos sudėtingumu, nors horizontalus šilumokaitis nedaug brangesnis, todėl tokia sistema privalo būti tinkamai suprojektuota, atsižvelgiant į visus parametrus ir kintamuosius nepriklausomai nuo tipo. Atliekant ilgalaikius matavimus ir stebėjimus, buvo pastebėta, kad per keletą eksploataavimo metų, vidutinė žemės temperatūra aplink šilumokaitį nukrenta apie kelis laipsnius, tačiau ilginiui, stabilizuojasi ir išlieka pastovi. Kadangi tokios sistemos įrengiamos ilgam laikotarpiui, todėl reikia įvertinti net ir tokius menkus pakitimus, bei galimas įvairias gamtos anomalijas. Viena iš galimų gamtos anomalijų tai giluminiai šaltiniai, ar nenumatytas grunto pasikeitimas, grunto porėtumas.

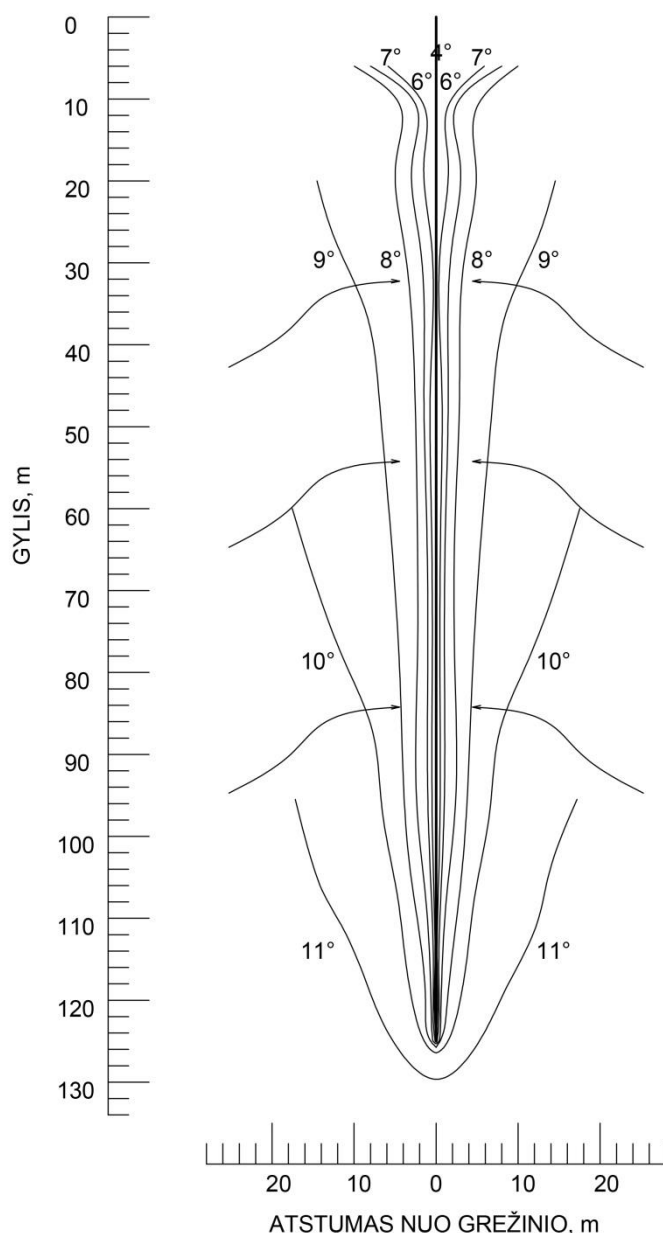
Dažniausiai įrenginėjant tokio tipo šilumokaičius yra kertama bent viena vandens arterija ar gysla, o paviršiniuose sluoksniuose aplink šilumokaitį, priklausomai nuo reljefiniu sąlygų, būna nemažai įvairaus dydžių kapiliarinių arterijų. Dėl to atsiranda ar gali atsirasti šilumos nuostolių, kai su vandeniu nusinešama dalis šilumokaičio potencialo. Tačiau mokslininkų teigimu [31] šie nuostoliai sudaro tik 5%-10% viso galingumo. O paviršutiniuose sluoksniuose dėl mažų kiekių ir vandens stacionarumo galima ir nevertinti kaip nuostolių.

Dėl padidėjusio šilumos siurblių naudojimo vėsesnio klimato zonose, ir išsiplėtusios duomenų bazės, mokslininkai sukaupė nemažą duomenų bazę su visais trūkumais ir privalumais. Vienas iš pagrindinių trūkumų, su kuriuo susiduriama vertikaliuose gręžiniuose, yra efektyvūs šilumos mainai tarp grunto ir šilumos nešėjo: vandens, propilenglikolio ar jų mišinio. Taip pat susiduriama su problema, kuomet turime nepageidautinus šilumos mainus tarp įtekėjimo ir ištekėjimo linijų.

Žemo potencialo šilumos šaltiniai plačiau pradėti naudoti pastaruosius 20 metų. Įvairūs moksliniai tyrimai ir eksperimentai susiję su geoterminiu šildymu trunka ne vienerius metus, o pamatyti rezultatų pasikeitimą ar įtaką aplinkai, galima tik po daugelio metų. Vienas iš ilgiausiai trunkančių eksperimentų yra atliekamas Šveicarijos mieste [32], Ciuriche, jis buvo pradėtas (1986 m.) individualiame name. Individualiame name buvo sumontuotas geoterminis šildymas su vertikaliu šilumokaičiu, o šilumos siurblys buvo naudojamas tik šildymo sezono metu. Aplink geoterminį gręžinį įvairiais spinduliais buvo išgręžioti papildomi 100 m gylio vertikalūs gręžiniai, o juose sumontuoti temperatūros matavimo prietaisai. Taip pat sumontuota apie 30 atskirų matavimo taškų įvairiose vietose ir nuotoliuose. Pasinaudojęs šio eksperimentu gautais rezultatais, atliktais matavimais ir prielaidomis, pasinaudota ir pritaikyta šiame tiriamajame darbe. Atlikus matavimus, buvo pastebėta, kad temperatūra mažai pasislenka į žemesnę pusę, tokiu būdu buvo įrodyta prielaida, jog kvazipastovi pusiausvyra buvo pasiekta jau po pirmų kelių metų naudojant šilumos siurblių. Baigiantis šildymo sezonui ir „pasitraukus“ išalui iš grunto, pradedama fiksuoti atmosferos įtaka gruntui, tačiau ji jaučiama tik pirmus 10 m, o gilesnius sluoksnius veikia tik geoterminė žemės gelmių šiluma. Atlikti mokslininkų skaičiavimai ir matavimai nustatė, kad per šildymo sezoną sutrikdyta natūrali temperatūrinė pusiausvyra pilnai neišsilygina per šiltąjį laikotarpį. Visiškai grunto atsistatymui, reikalingas ilgesnis laiko tarpas. Mokslininkų iškelta teorija bando įrodyti, kad panaudojus vertikalaus tipo šilumokaitį 40 metų, grunto temperatūra išsilygins ir sugrįš į pradinę stadiją tik po dar 40 metų. Kaip žinia Lietuvoje šildymo sezonas trunka apie 200 dienų, iš kurių bent viena savaitė lauko temperatūra nukrenta žemiau  $-15^{\circ}\text{C}$ , todėl per vasarą grunto pilnas atsistatymas yra beveik neįmanomas.

Mano tiriamajame projekte yra naudojamas vertikalus gręžinys, kurio gylis siekia apie 125 metrus. Pradėjus šilumos siurblio eksploataciją grunto temperatūra ties šilumokaičiu siekė apie  $+11^{\circ}\text{C}$ . Temperatūra buvo fiksuojama gruntinio šilumokaičio grįžimo linijoje ir visi duomenys fiksuojami valdikliu. Atlikus matavimus po kelių sezonų buvo pastebėta, kad per šiltąjį laikotarpį grunto temperatūra nusistovėjo ties  $+9^{\circ}\text{C}$ . Taip pat eksploatacijos metu, per šildymo sezoną, grunto temperatūra, aplink šilumokaitį, krenta 7 laipsniais, nuo  $+11^{\circ}\text{C}$  iki  $+4^{\circ}\text{C}$ , o pasitaikius šaltesnei žiemai vidutinė temperatūra gali nukristi ir iki  $+2^{\circ}\text{C}$ . O esant šalčio atakoms gruntas aplink šilumokaitį atšaldomas ir iki minusinių temperatūrų. Pasinaudojus gautais rezultatais bei

palyginus su kitų mokslininkų atliktais [32] matavimais buvo gautas temperatūros pasiskirstymas grunte pirmaisiais mėnesiais, kurį pateikiu 5.20 pav.



5.20 pav. Temperatūros pritekėjimas iš gilesnių sluoksnių.

Šie rezultatai yra preliminarūs ir teoriniai, bet neturėtų labai skirtis nuo realaus vaizdo. Viduryje pavaizduotas gręžinys, kuriuo teka žemesnės temperatūros vanduo ar propilenglikolis, kuris labiausiai ir atšaldo paviršinius sluoksnius. Iš grafiko matosi kaip grunte pasiskirsto temperatūra įvairiais atstumais tolstant nuo šilumokačio. Zonoje, esančioje prie pat šerdies, gruntas atšaldomas iki  $+4^{\circ}\text{C}$  -  $+6^{\circ}\text{C}$ . Tolesniuose sluoksniuose nuo gręžinio, temperatūros susinormalizuoja. Taip pat galimi įvairūs temperatūros pasiskirstymo iškraipymai dėl skirtingo grunto ir jo tankio nevienodumo, tai gali būti dėl smėlio, molio priemaišų ar porėtumo. Toksai temperatūros pasiskirstymas, kaip pavaizduotas paveikslėlyje, matomas tik pirmoje šildymo sezono pusėje, tačiau šildymo sezono gale gruntas atšaldomas iki gilesnių sluoksnių, o esant

intensyviai šilumos siurblio naudojimui šildymo sezono metu, gruntas nespėja regeneruoti ir atsistatyti, taip pasiekiamos ir minusinės temperatūros.

Analizuojant termodinaminę grunto sistemą privalu identifikuoti tinkamiausią šilumos perdavimo procesą ir tik tada bus galima tinkamai įvertinti visą sistemą. Kaip žinia kompleksiškus šilumos mainus galime suskirstyti į paprastesnius procesus: šilumos laidumo, konvekcijos ir spinduliavimo. Kaip žinia, šilumos laidumas yra pagrindinis perdavimo būdas tokio tipo šilumokaičiuose. Šilumos laidumas dirvožemiui išreiškiamas šilumos energijos srautas kuris teka skersai grunto paviršiaus plotą dėl temperatūros gradiento. Tuomet šilumos srautas galima išreikšti paraboline daline diferencialine lygtimi:

$$\nabla(\lambda \nabla T) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.1)$$

Čia:  $\lambda$ - šilumos laidumas,  $T$ - tai temperatūra  $^{\circ}\text{C}$ , Tūrinė šiluminė talpa skaičiuojama  $C = \rho c$  ( $\text{J}/\text{Km}^3$ )

Šilumos perdavimas viena kryptimi  $n$ , skaičiuojamas pasitelkus Furjė dėsnį:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5.2)$$

Šilumos pritekėjimą iš gilesnių sluoksnių galima skaičiuoti pasitelkus šią formulę:

$$J(H) = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (5.3)$$

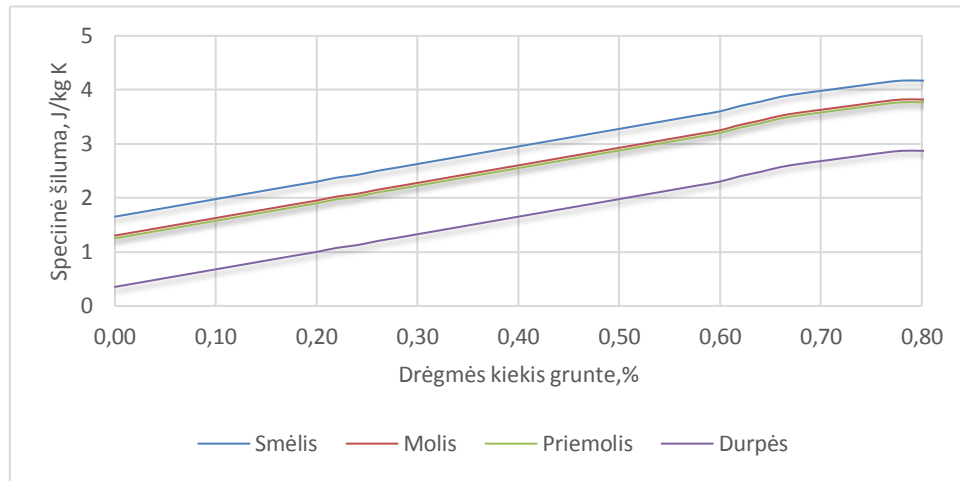
Čia:  $T$ -grunto temperatūra,  $z$ -grunto gylis.

$$\lambda = \lambda^* + D_d \cdot L \quad (5.4)$$

Čia:  $\lambda^*$ -momentinis šilumos laidumas,  $D_d$  - drėgmės šiluminė difuzija,  $L$  – latentinė šiluma-2,449 MJ/kg.

$$C_v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial J_H}{\partial z} \quad (5.5)$$

Kaip žinia gruntas yra maišytas ir kintant gyliui dažnai skiriasi savo sudėtimi ir drėgmės kiekiu, todėl skiriasi tankis bei įvairūs šiluminiai parametrai. Pagrindinis veiksnys, darantis įtaką specifinei šilumai, yra drėgmės kiekis grunte ir tik tada grunto tipas. Didėjant drėgmės kiekiui didėja ir specifinė šiluma.



5.21 pav. Specifinės šilumos priklausomybė nuo drėgmės kiekio grunte.

Grafike atsispindi kaip drėgmės kiekis tiesiogiai daro įtaką specifinei šilumai, tačiau pasiekus beveik 70% drėgmės kiekį, grunto specifinė šiluma nebekinta. Dažniausiai tokiaame gylyje pasitaikantis drėgmės kiekis yra tik keli procentai.

Sujungus šilumos pritekėjimo formulę (5.1) su energijos išlaikymo formule (5.2), gauname pagrindinę išraišką, šilumos srautui grunte nustatyti. Grunto temperatūros išraiška per laiką erdvėje, apskaičiuojama taip:

$$\rho_d c_d \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.6)$$

Čia:  $\rho_d$ -dirvožemio tankis,  $c_d$ - dirvožemio specifinė šiluma.

Atlikus grunto drėgmės ir temperatūros matavimus bei pritaikius skaičiavimus, buvo apskaičiuotas šilumos pritekėjimas į šilumokaitį, šiuo atveju jis siekia apie 3 W/m<sup>2</sup>. Tokiu atveju mes turime 39 m<sup>2</sup> paviršiaus plotą per visą gręžinio ilgį, o visas gręžinio tūris siekia 0,9 m<sup>3</sup>. Tačiau naudingas tik 0,7 m<sup>3</sup> Visas gręžinio galingumas siekia apie 1.2 kW, žemės šilumos srautas (80 – 100 mW/m<sup>2</sup>).

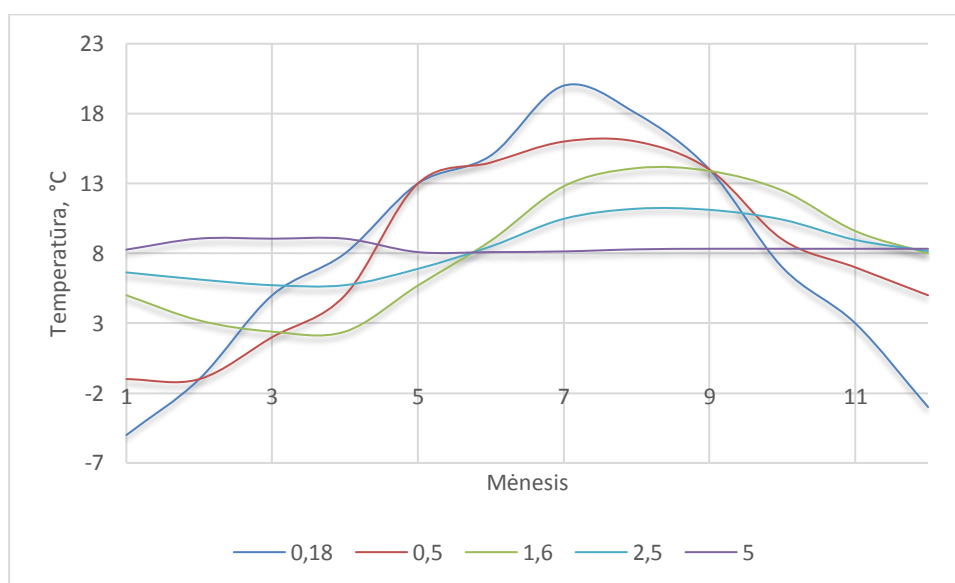
Atsiradus didesniai šilumos poreikiui, ar nukritus atmosferos temperatūrai, šilumos siurblio kompresorius pradeda veikti nesustojamai. Tokiu atveju grunto temperatūra ženkliai krenta net iki žemesnės nei 4°C, o tai ženkliai sumažina šilumos siurblio naudingo veikimo koeficientą. Dėl didelio grunto inertiškumo temperatūra atsistato lėčiau, todėl šilumos siurblys veikia intensyviau, be pertraukimų. Kaip buvo pastebėta iš anksčiau pateiktų grafikų, tokia sistema puikiai veikia esant būdinčiam režimui, kai gyvenamosiose patalpose palaikoma santykinai žemesnė temperatūra. Taip pat galimas variantas ir elektrinių išorinių prietaisų naudojimo, tačiau elektriniai prietaisai niekaip neprilygsta sistemai, dirbančiai su šilumos siurbliu, jei lyginsime naudingo veikimo koeficientus. Šilumos sistemos naudojant šilumos siurblių naudingo veikimo



koeficientas retai sumažėja iki dviejų, kai paprastų elektrinių šildymo prietaisų naudingo veiksmo koeficientas siekia veną. Kitas sprendimo būdas yra keliais laipsniai sumažinant temperatūrą, esančią patalpose, tačiau taip prarandamas komfortas, bei gali ne atitikti nustatytų higienos normų.

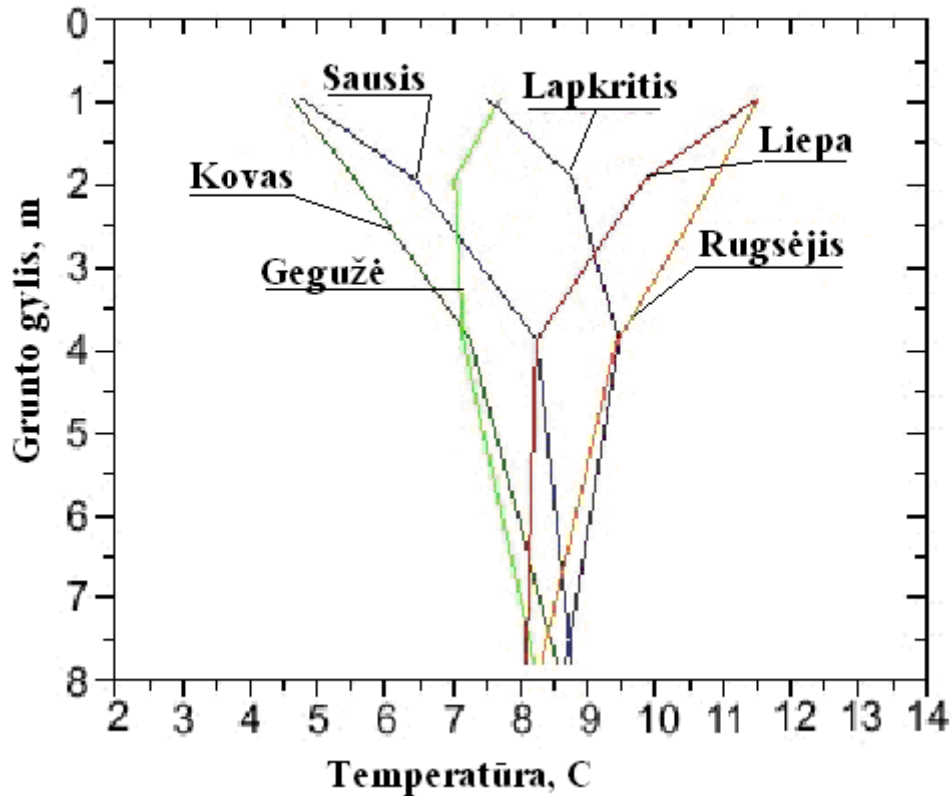
## 5.2. Šiluminiai matavimai

Šalia vertikalaus gręžinio apie 2,5 metro atstumu įvairiuose gyliuose, yra įkasti temperatūros matavimo prietaisai, kuriais matuojama pastovi grunto temperatūra. Visi matavimai buvo atliekami dar neprasidėjus šilumos siurblio eksploatacijai, gauti rezultatai pateikiami (5.21 pav.)



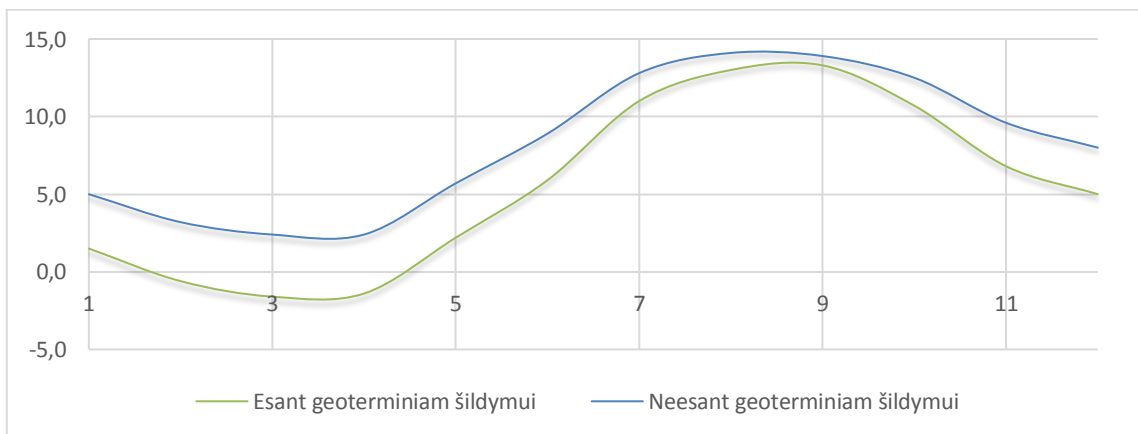
5.22 pav. Grunto metinė temperatūra priklausomai nuo gylio.

Atlikus matavimus įvairiuose gyliuose buvo gautas metinis grunto temperatūros pokytis skirtinguose gyliuose. Gauti rezultatai tik patvirtino, kad šiose klimatinėse sąlygose, rezultatai sutampa su žinybų pateikiamais matavimus, o tai įrodo kad atmosferos įtaka mažėja ir visiškai išnyksta 10 metrų gylyje. Tuomet gauti rezultatai buvo palyginti kartu su panašios geografinės platumos, tačiau kitos Europos sąjungos šalies atliktais platesniais matavimais. Kaip matosi 5.23 pav. šie matavimai yra identiški ir tarpusavyje nesiskiria nuo atliktų šiuo tiriamuoju projektu, todėl galima teigti, kad grunto temperatūra ir savybės yra panašios įvairiose geografinės vietose. O grunto temperatūra per visa gyli svyruoja apie 10°C.



5.23 pav. Vidutinė grunto temperatūra Nottinghame.

Pirmasis eksploatacijos metais šilumos siurblys neveikdavo pilnu pajėgumu, dažnai veikė būdinčiu režimu, vyko derinimo darbai ir eksperimentiniai matavimai. Antrasis eksploatacijos metais buvo pradėti matavimai nuo šildymo sezono pradžios, tačiau labai didelių nukrypimų nebuvo pastebėta. Tačiau prasidėjus trečiam šildymo sezonui buvo pastebėti nesutapimai su pirminiais matavimais. Buvo pastebėta, kad grunto temperatūra atsistato lėčiau ir ne visiškai pilnai. Atlikti matavimai buvo visame gylių spektre, tačiau palyginimui pateikiu matavimus atliktus 1.6m gylyje, kurį intensyviai dar veikia atmosferos veiksnys.



5.24 pav. Temperatūros metinis nuokrypis nesant geoterminiam šildymui, 1.6m gylyje.

Atlikus matavimus buvo pastebėta, kad grunto temperatūra 1,6 metro gylyje sezono pradžioje buvo 0.8°C mažesnė nei prieš pora metų, kuomet nebuvo šilumos siurblio. Nors tokį nedidelį nukrypimą galima laikyti kaip netikslumą, tačiau tai buvo pastebima ir antrą sezoną. O šildymo sezono pabaigoje temperatūrų skirtumas siekė 4°C - 5°C. Net ir tokiu atstumu nuo gruntinio šilumokaičio jaučiama jo įtaka. Todėl galima daryti išvada, kad gruntas, gruntas yra intensyviai atšaldomas, o net ir paviršinis sluoksnis atsistato lėčiau ir vėliau.

### **5.3. Šilumos siurblio analizė**

Prieš gręžinio kasimo darbus visi aptari grunto temperatūros nukrypimai buvo įvertinti, bei atsižvelgta į pastato konstrukciją. Gręžinio parinkimo vieta buvo pasirinkta tolimiausiame taške nuo namo. Tokiam pasirinkimui didelę įtaką darė, nenatūralus temperatūrų svyravimas. Gręžinys nuo gyvenamojo namo buvo iškastas apie 17 metrų atstumu, tačiau prieš atliekant kasimo darbus buvo atlikti pastato pamatų įkasimo gylio vertinimas, kuris yra skaičiuojamasi atsižvelgiant į tyrimo vietos geologinės ir hidrogeologinės sandaros sudėtingumą, silpnųjų gruntų buvimą geologiniame pjūvyje, taip pat įvertinant geotechninę kategoriją. Taip pat parinkimo vieta buvo atlikta pagal visus geoterminių šulinių kasimo darbų reikalavimus. Tačiau dar papildomai buvo atlikti ir matavimai kuriais buvo pastebėtas paviršinių grunto sluoksnių užšalimas, kuomet temperatūra nukrenta žemiau 0°C, tačiau matavimai parodė, kad gręžinio vieta neturi įtakos pastato konstrukcijai ir geoterminis šilumokaitis gali būti eksploatuojamas.

Įvertinus išmatuotus didelius temperatūros pokyčius, esančius paviršiniame sluoksnyje, bei palyginus su kitų mokslininkų [32] atliktais skaičiavimais buvo nuspręsta pagreitinti ir pagerinti žemės terminę regeneraciją. Tam atlikti reikalingi pigūs efektyvūs ir nebrangūs būdai:

- Šilumos siurblio ciklo apsukimas naudojant patalpų vėsinimui vasaros metu,
- Šilumos siurblio ciklo apsukimas naudojant grindų vėsinimui,
- Papildomo šilumokaičio įrengimas,
- Perteklinės saulės šilumos panaudojimas.

Šilumos siurblio ciklo veikimas atvirkštiniu būdu yra vienas pagrindinių, paprasčiausiu ir pigiausiu būdu skirtų žemei regeneruoti. Tačiau reikalauja didesnių elektros energijos sąnaudų bei sudėtingesnės valdymo įrangos. Kadangi vykdomame projekte yra naudojamas ortakinis šildymas, visa ortakinė sistema privalo būti papildomai izoliuota specialia, kondensatui atsparia, šilumai nelaidžia izoliacija, kuri efektyviai veiktu šildymo ir šaldymo metu. Taip pat privalo iš anksto numatyti kondensato nuvedimus.

Šilumos siurblio ciklo apšukimas, naudojant grindų vėsinimui, yra itin patogus ir efektyvus. Šis būdas yra tinkamas tuomet, kai turime didelį grindų plotą bei jau iš anksto išvedžiotą vamzdyną. Tačiau šis atvejis nėra tinkamas šiuo atveju, nes name nėra išvedžiotas grindinis šildymas. Tačiau šis būdas pasižymi ir kitais minusais, vienas iš jų blogos komfortinės sąlygos esant itin vėsioms grindims, sukuriama nemalonus, nekomfortiškas jausmas. Taip pat nuo atšaldyto betono sunku nuvesti šaltį į šiltesnę aplinką. Kai tuo tarpu šilumos nuvedimas į aplinką, nuo grindų, vyksta savaime ir sparčiai. Kita problema su kuria susiduriama yra kondensato susidarymas ant šaltų paviršių, kadangi tikėtinas toks atvejis kuomet grindis bus atvėsintos žemiau rasos taško, tuomet pradeda kauptis kondensatas, kuris nėra pageidautinas gyvenamosiose patalpose.

Papildomo šilumokaičio naudojimas, tai papildomo horizontalaus tipo šilumokaičio įkasimas 0.5 – 1 metrų gylyje. Taip pat iš grafiko matosi, kad šilumokaitis turėtų būti įkastas pakankamai toli nuo pagrindinio vertikalaus šilumokaičio, bei individualaus namo. Tačiau šis būdas nėra labai efektyvus nes reikalauja didelių investicijų ir nėra atsiperkantis, dėl didelio vamzdžio ilgio, didelio propilenglikolio kiekio, papildomų investicijų sistemos įrengimui ir valdymui. Taip pat nedidelis temperatūrų skirtumas tarp vertikalaus ir horizontalaus šilumokaičių, reikalauja didinti paviršių plotą. Naudojant šilumos siurblių išauga elektros energijos kaštai, valdymo sistema pasidaro komplikuočiau, atšaldomas paviršinis grunto sluoksnis. Nors iš grafikų matosi, kad paviršinių sluoksnių temperatūra atsistato greitai, tačiau prastėja ir lėtėja augalijos augimas.

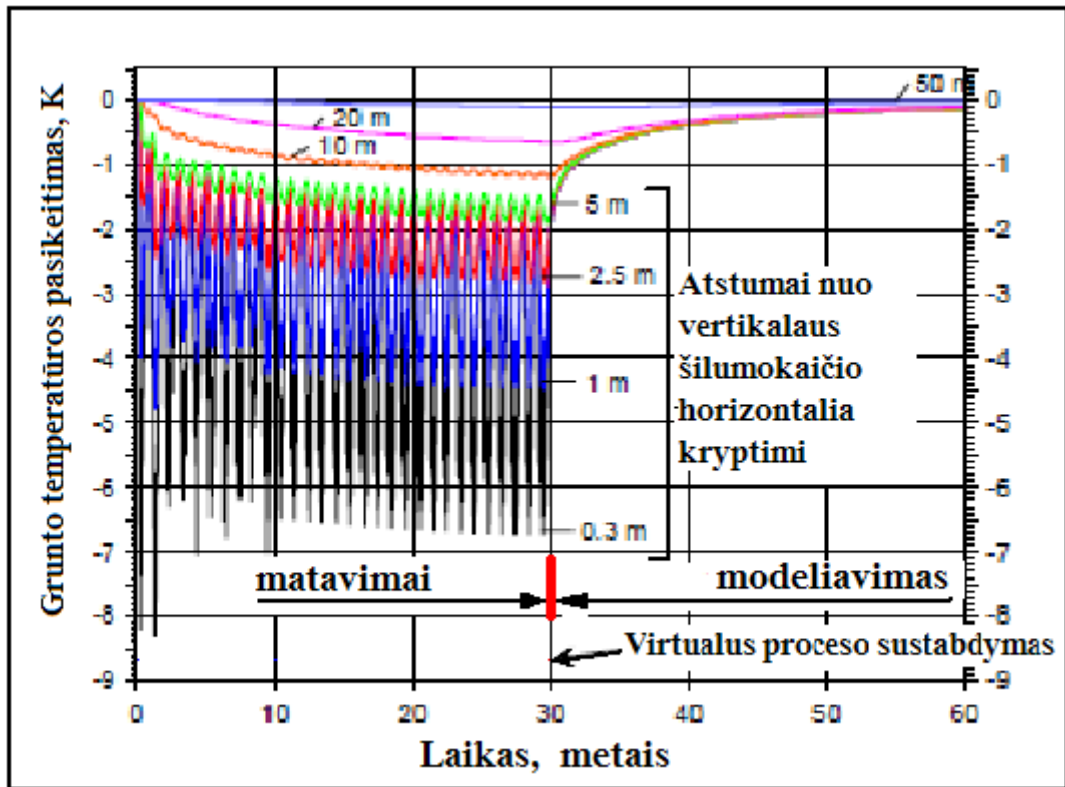
Perteklinės saulės šilumos nuvedimas į gruntą yra žymiai paprastesnis ir lengvesnis būdas, nei kiti pateikti būdai, tačiau jis reikalauja didesnių investicijų į papildomą įrangą. Šiuo metu itin populiarėja saulės kolektoriai karšto vandens ruošimui šiltuoju metų laiku, ši sistema tampa populiarė ne tik individualiuose namų ūkiuose, bet ir daugiabučiuose mieste. Tai padidinus investicijas į papildomas saulės kolektorių plokštes, galima gauti didelius perteklinių energijos kiekius. O turint gerai sureguliuotą valdymo sistemą ir didelį saulės kolektorių plotą, galima ne tik greit regeneruoti gruntą, bet ir sukaupti perteklinę saulės šilumą šildymo sezonui, taip savo horizontalų gręžinį paverčiant didžiule akumuliacine talpa. Tačiau reikia įvertinti, kad visa sukaupta perteklinė saulės energija nebus susigražinta 100% šildymo sezono metu, o tai gali įvykti dėl daugelio priežasčių. O nuostoliai į aplinką gali viršyti iki 15%. Tokiu pertekliniu saulės energijos gabenimu į gruntą, mes dirbtinai atliekame natūralų grunto regeneravimą per trumpesnį laiko tarpą, o suakumuliuojam tik nedidelę jos dalį.

Saulės kolektorių sistemos minusai gali netiesiogiai pasitarnauti šildant gruntą ir derinant šias dvi sistemas. Vienas iš pagrindinių saulės kolektorių sistemos trūkumų, kuomet naudojama

karštam vandeniui ruošti, yra dažnas vandens užvirimas. Nes tokiai sistemai privalu užtikrinti pastovų karšto vandens vartojimą saulėtomis dienomis, nes kitu atveju sistema gali būt sugadinta. Tokie atvejai dažnai pasitaiko palikus sistemą įjungtą ilgą laiką be šilumos nuvedimo. Todėl dažnai galima pamatyti, vasaros metu, kuomet saulės kolektoriai yra uždengiami. Kadangi sistema yra slėginė, todėl temperatūra dažnai pakyla virš 100°C. Tokiu atveju dažnai statomi išmanūs valdikliai, kurie esant 90°C ir didesnei temperatūrai nakties metu, vandenį priverstinai pumpuoja į saulės kolektorius atsivėsinti, esant vėsesniam orui naktį 90°C vanduo greitai atvėsta. Tačiau šita sistema neveikia esant kolbos tipo saulės kolektoriams, tokiu atveju tenka šildyti gruntą, šalia esantį tvenkinį, baseiną ar nuotekas. Palikus saulės kolektorius ilgesniam laikui ir susiklosčius „nepalankioms“ oro sąlygoms (karštos giedros dienos, trumpos ramios naktys) buvo pastebėta, kad nakties metu nebeužtenka šilumai nuvesti į aplinką. Kiti minusai, su kuria susiduria ši sistema, dideli karšto vandens kiekiai tenkantys cirkuliaciniam siurbliui, trumpina jo veikimo trukmę, susidaro kavitacija, o dėl didesnių temperatūrų kaista elektrinės bei plastmasinės dalys. Pats paprasčiausias šios problemos sprendimo būdas yra karšto vandens drenavimas į kanalizaciją, tačiau ne visos sistemos yra tinkamos tokiems veiksams atlikti. Taip pat vanduo prieš patekdamas į nuotekas privalo būt atvėsintas. Todėl grunto šildymas yra racionalus sprendimas turint šilumos siurblį su gruntiniu šilumokaičiu.

Pastaraisiais metais paskelbiama daug mokslinės medžiagos, susijusios su vertikalių šilumokaičių efektyvumo matavimais ir skaičiavimais, taip pat poveikiu žemės gruntui. Taip pat 2015 metais pasauliniame kongrese [25] Australijoje, Melburne, Lietuvos atstovų buvo pristatyta studija apie Lietuvos geoterminės energijos panaudojimą. Joje buvo pristatomi esami projektai, bet ir galimybės, galimybėmis plėsti geoterminį panaudojimą Lietuvoje.

Anksčiau minėtam, Šveicarijoje atliktame tyrime buvo pateikti temperatūros matavimai [32] ir išreikšti grafiku. Kuriame matome, daugiamečiai matavimai atlikti įvairiuose atstumuose nuo vertikalaus šilumokaičio, o po to matematinio modeliavimo būdu paskaičiuota, kaip grunto temperatūros atsistato nustojus naudoti šilumos siurblį. Kaip žinoma gruntas yra labai inertiškas, todėl tiek viena kryptimi, tiek ir kita (kai temperatūros didėja iki vidutinės grunto temperatūros) procesai vyksta keletą dešimtmečių, kol nusistovi pastovi temperatūra.



5.25 pav. Grunto temperatūros grafikas.

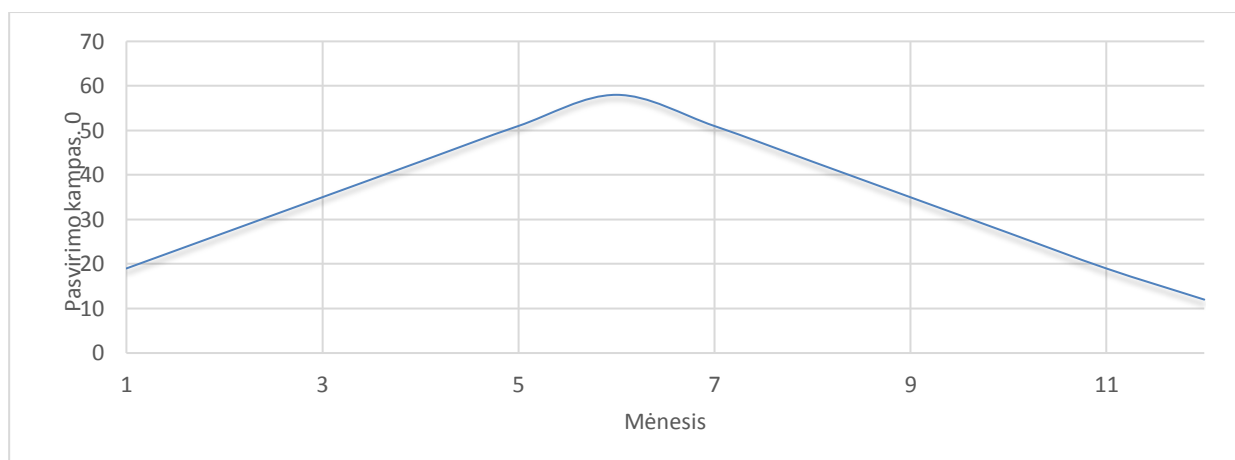
Iš grafiko matosi kaip šilumos siurblys įtakoja temperatūros pasiskirstymą grunte per 30 metų. Todėl priverstinė grunto regeneracija yra privaloma ir naudinga, nes kitu atveju kiekvienais metais bus prarandami dideli energijos kiekiai.

#### 5.4. Saulės kolektoriai

Kita mokslininkų pabrėžiama problema [15], kuri iškyla esant vertikaliajam gręžiniui, yra susijusi su šilumos inercija grunte. Geoterminės šilumos pritekėjimas iš gilesnių grunto vietų yra nepalyginamai mažesnis su absorbuotais saulės kiekiais paviršiniuose sluoksniuose. Todėl giluminiai sluoksniai esantys giliau 10m regeneruoja lėčiau. Tai ne tik sumažina sistemos efektyvumą, bet ir jos galingumą. Vasaros metu naudojant šilumos siurblių atvirkštiniu ciklu nepasiteisina dėl nedidelių energijos kiekių, bei nedidelio skirtumo tarp įtekėjimo ir ištekėjimo temperatūros. Šilumos siurblio ciklo temperatūros didinimas nėra naudingas dėl ekonominių sumetimų. Todėl įvertinus šiuos ir anksčiau aptartus privalumus buvo pasirinkta naudoti saulės kolektorių sistemą, grunto regeneracijai ir šilumos kaupimui.

Saulės kolektorius buvo pasirinkta plokščio tipo. Saulės kolektorių konstrukcija susideda iš vamzdžio padengto specialiais juodos spalvos saulės energiją sugeriančias dažais ir patalpintas sandarioje uždaroje dėžėje, kurios vienas galas yra stiklas ir atsuktas į saulę. Šia sistemą sudaro 5

nuosekliai sujungtos saulės kolektorių plokščių sistemos. Visos saulės kolektorių darbinės pusės atsuktos į pietinę pusę ir pasvirusios apie  $50^{\circ}$  kampu. Kampas nustatomas individualiai kiekviename regione skirtingai, Kauno rajone saulės kolektorių pasvirimo kampas kinta tokiu grafiku:



5.26 pav. Saulės kolektorių naudingumo priklausomybė nuo temperatūros.

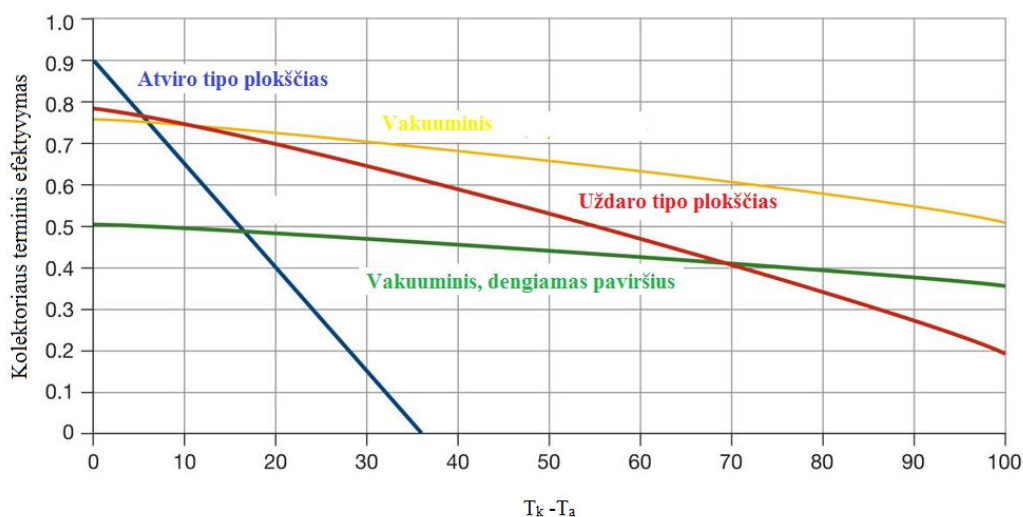
Kaip matosi iš grafiko saulės kolektorių sistemos pasvirimo kampą privalu keisti, kiekviena mėnesį, tuo tikslu pilnai išnaudojant saulės kolektorius ir jo galimybes. Tačiau šiuo atveju ši sistema nebuvo įgyvendinta dėl sudėtingų konstrukcijų ir sujungimo sistemos reikalavimų. Pasirinktas vienas stacionarus kampas esantis du karščiausius metų mėnesius.

Tokia regeneracijos sistema optimaliausia sureguliuoti taip, kad pilnai išnaudojant gruntinį šilumokaitį ir saulės kolektorių sistemą. Tačiau taip sureguliuoti reikalinga sudėtingo algoritmo, kuriuo įvertintume temperatūrą grunte, temperatūrą vandens esančio gręžinio dugne bei aplinkos temperatūrą. Tokia valdymo sistema turėtų būti suprogramuota individualiai šiai sistemai, kuri dėl sudėtingo loginio valdiklio, išbrangtų apie 400-700 eurų neįvertinus programavimo darbų. Tokiu atveju efektyviausia pasirinkti vieną būdą, kai pilnai išnaudojama saulės kolektorių sistema arba gruntinis šilumokaitis. Šilumokaičio išnaudojimas taip pat reikalauja loginio valdiklio, tačiau paprastesnio ir su mažesniu duomenų kiekiu. Tokia sistema veikia, kai akumuliacinėje talpoje kaupiamas karštas vanduo, o cirkuliacinis siurblys įsijungia kuomet grunto temperatūra nekinta nustatytą laiko intervalą. Tokiu cikliniu darbu cirkuliacinis siurblys ir gruntinis šilumokaitis veikia žymiai efektyviau ir našiau, išvengiama elektros nuostolių. Šios sistemos minusas yra, kad saulei užkaitinti akumuliacinę talpą vienu laipsniu, kolektorių naudingumas mažėja apie 0.5%. Taip pat gruntiniam šilumokaičiui, bei saulės kolektoriams kenkia staigus temperatūrų skirtumas. Vykstant lėtiems mainams grunte, per tą laiką akumuliacinėje talpoje vanduo gali būti užkaitinamas iki  $75^{\circ}\text{C}$  ir daugiau, o suveikus siurbliui akumuliacinėje talpoje staigiai pasikeičia temperatūra, nes iš grunto gali grįžti  $8^{\circ}\text{C}$  ir mažesnės temperatūros vanduo. Taip staigiai nukritus vandens temperatūrai akumuliacinėje talpoje į saulės kolektorius bus paduodamas žemos temperatūros vanduo, dėl

staigaus temperatūrų skirtumo gali susigadinti absorbcinių plokštelių suvirinimai ar net pati absorbcinė danga. Kuri dėl didelio temperatūrų skirtumo ir ciklų kiekio gali sutrūkinėti ir nubyreti, tuomet mažėja saulės kolektorių naudingumas. Taip pat tokiam veikimui reikalingas temperatūros daviklis gruntiniame šilumokaityje, kuris pastoviai fiksuotu vandens temperatūrą, o jo įrengimas labai pabrangintu sistemos atsiperkamumą.

Sistema, kuomet veikimas reguliuojamas pagal akumuliacinės talpos temperatūrą, yra pats paprasčiausias ir reikalaujantis mažiausiai investicijų. Ši sistema veikia, kuomet akumuliacinėje talpoje temperatūra pasiekia nustatytą ribą ir įjungiamas siurblys, o visas vandens kiekis nupumpuojamas į požeminį gręžinį. Viskas veikia cikliškai ir nesudėtingai. Tokiu veikimu pilnai išnaudojami saulės kolektoriai ir jų naudingumas.

Pasinaudojus žinytų patiekiamais saulės kolektorių naudingumo grafikais buvo įvertintas ir šiuo metu turimi saulės kolektoriai [14]. Grafike pateikiami skirtingų konstrukcijų kolektorių efektyvumai tarp ištekančios fluideo ir aplinkos temperatūros skirtumu. Tačiau kiekvienas gamintojas pateikia savo gaminio patikslintas priklausomybes. Tačiau pasinaudojus šiais grafikais galim susidaryti bendrą vaizdą tarp skirtingų saulės kolektorių tipų, bei pasirinkti tinkamiausia tipą. Kaip matosi iš grafiko visi saulės kolektoriai turi 10% ir daugiau optinius nuostolius, kurie susidaro dėl nepilnos spinduliuotės sugėrimo, kai dalis jos atspindima į aplinką.



5.27 pav. Saulės kolektorių naudingumo priklausomybė nuo temperatūros.

Kaip matosi grafike pagaminta saulės kolektorių sistema (uždaro tipo plokščiasis) pasižymi neblogomis savybėmis esant nedideliems skirtumams tarp aplinkos ir ruošiamo vandens. Kadangi šioje sistemoje vanduo nebus ruošiamas aukštesnės temperatūros nei 60°C, tuomet saulės kolektoriai bus išnaudojami žymiai efektyviau.





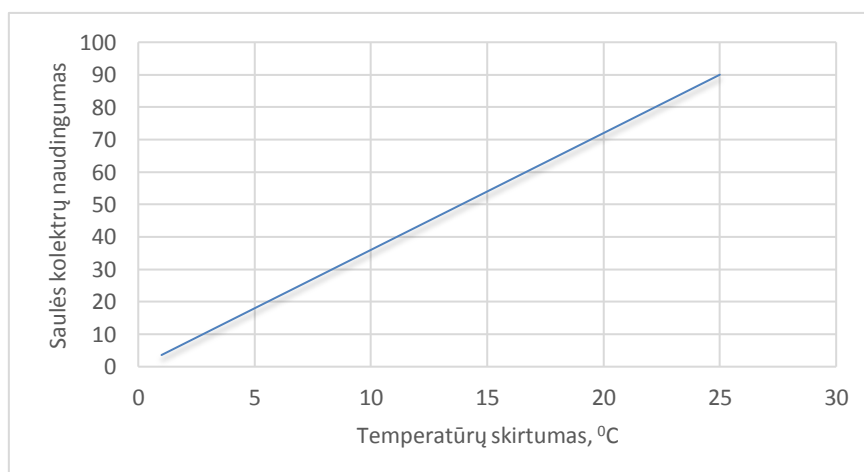
5.28 pav. Saulės kolektorių išdėstymas ant pastato stogo.

Taip pat buvo atlikti skaičiavimai kartu su eksperimentiniais matavimais. O visa tai išreiškiant (5.11) formule.

$$\eta_k = \frac{mc_p(T_1 - T_2)}{G_r} \quad (5.11)$$

Čia:  $m$  masinis debitas sistemoje [l/s].  $G_r$  saulės radiacija [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $T_1$  vandens temperatūra ištekant, [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_2$  vandens temperatūr įtekant [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $c_p$  savitoji šiluma [ $\text{J}/\text{kg K}$ ].

Žinynuose saulės spinduliuotė, šiose klimatinėse sąlygose, siekia apie  $600\text{-}800 \text{ W}/\text{m}^2$ , todėl skaičiavimams priėmiau vidutinės saulės spinduliuotės reikšmės  $700 \text{ W}/\text{m}^2$ .



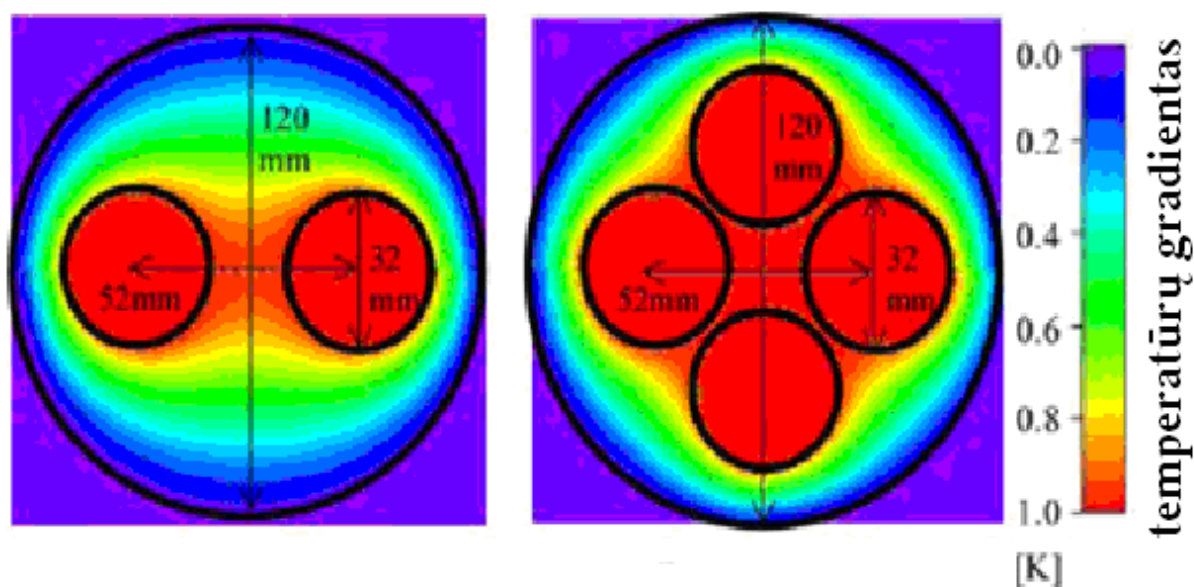
5.29 pav. Saulės kolektorių naudingo veiksmo grafikas.

Pasinaudojus skaičiavimais [20] buvo gauta tiesinė priklausomybė kaip mūsų turimų saulės kolektorių naudingumas priklauso nuo įtekamos ir ištekamos vandens temperatūros. Kaip matosi iš grafiko didėjant skirtumui didėja naudingumas. Atlikus eksperimentą buvo užfiksuotas vidutinis

44% naudingumas, eksperimentas buvo atliekamas vidutinę vasaros diena, tačiau giedrą saulėtą dieną efektyvumas padidėja.

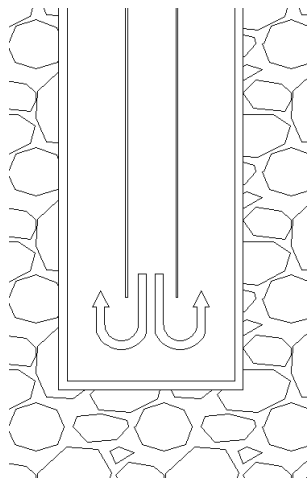
### 5.5. Gruntinis šilumokaitis

Vertikalūs gręžiniai, skirti tiek šilumos tiek šalčio nuvedimui, yra brangesni lyginant su kitomis sistemomis, tačiau investicija atsiperka greitai, nes gauname gerokai mažesnę šilumos (šalčio) kilovatvalandės kainą lyginant su kitais šilumos šaltiniais. Užtikrinti geresnius mainus tarp grunto ir šilumos nešėjo yra sudėtinga, dėl temperatūrų skirtumo ir grunto savybių. tuo tikslu dažniausiai naudojamas U tipo šilumokaičiai. Jo konstrukcija yra nesudėtinga ir labiausiai paplitusi, jo veikimas paprast, vienu vamzdžiu, vienodo skersmens, šilumnešis nusileidžia žemyn ir pašilęs keliauja į viršų. Šilumos nešėjo greitis pastovus visame vamzdyje. Didžiausias šio šilumokaičio minusas jo mažas efektyvumas ir intensyvus šilumos mainai tarp paduodamo ir grįžtamo vamzdžio dėl temperatūrų skirtumo. Kadangi padavimo ir grįžtamo vamzdeliai yra šalia vienas kito grįžtantis vanduo iš grunto pašildo šaltesnį įtekantį vandenį.



Šiame paveikslėlyje pateikiamame [3] puikia matosi kaip temperatūrų gradientas pasiskirsto vamzdyje, o jei yra naudojamos keli šilumokaičiai viename gręžinyje, taip prarandama dar daugiau naudingo veikimo koeficiento. Tokio tipo šilumokaičio naudingumas siekia tik 67%.

Todėl tuo atveju privalu naudoti kito tipo šilumokaitį vamzdis vamzdyje - koksalinį, kurio efektyvumas yra (įvairios literatūros pateikiami skirtingi skaičiai) apie 90%. Tačiau jo efektyvumas mažėja didėjant temperatūrų skirtumui tarp įeinančio ir išeinančio šilumos nešėjo.



5. 30 pav. Dabartinis šilumokaitis.

Kaip matosi iš paveikslėlio vidinis vamzdis yra mažesnio skersmens ir tūrio, nei išorinis, todėl esant vienodam masiniam debitui šilumnešio greičiai skiriasi, padavimo ir grįžimo linijose. Esant cikliniam veikimui šilumos mainai tarp įeinančio fluideo ir išeinančio vyksta ne taip intensyviai, todėl gaunamas toks didelis šilumokaičio naudingo veikimo koeficientas. O pagrindiniai šilumos mainai vyksta tarp grunto ir grįžtančio šilumos nešėjo.

Tačiau ši sistema yra nepatikima avarijos atveju kuomet trūksta išorinis vamzdis, kadangi ši sistema kuriama ne vienam dešimtmečiui, todėl išauga pažeidimų atsiradimo tikimybė. O atsiradus pažeidimams vamzdyje gali įvykti ekologinė nelaimė, kai į gruntą ar gruntinius vandenius patenka cheminės neužšalamos medžiagos. Todėl tuo tikslu yra naudojamos aplinkai nepavojingos ir neteršiančios medžiagos. Tačiau ir jų naudojamas kiekvienais metais vis griežtinamas ir reguliuojamas, aplinkosaugos ir valstybės. Todėl geriausia naudoti paprastą vandenį, tačiau dėl žemų (artimų minusinėms) temperatūrų gali atsirasti užšalimo galybių. Dėl šios priežasties ir buvo keičiamas garintuvas ir jo konstrukcija.

Pasirinkus vamzdis vamzdyje šilumokaitį ir įvykdžius geresnius šilumos mainus tarp grunto ir šilumokaičio, mums leido garavimo temperatūrą padidinti nuo  $-5^{\circ}\text{C}$  iki  $-7^{\circ}\text{C}$ . Tokiu atveju iš grunto atkeliavusį šilumos nešėją galime atvėsinti dar labiau, dėl to elektros energijos sutaupome apie 6-7%. Tačiau padidėjęs temperatūrų skirtumas mus priverčia investuoti į didesnio ploto garintuvą. Dažnai gali tekti keisti ir visą šilumokaitį dėl nepakankamo pralaidumo ir išaugusių slėgio nuostolių. Šilumos siurblio sistemos montuojamos ne vienam dešimtmečiui, garintuvas ir kondensatorius yra parenkami visam veikimo laikotarpiui, todėl reikia įvertinti ir investiciją į ilgalaikę naudą.

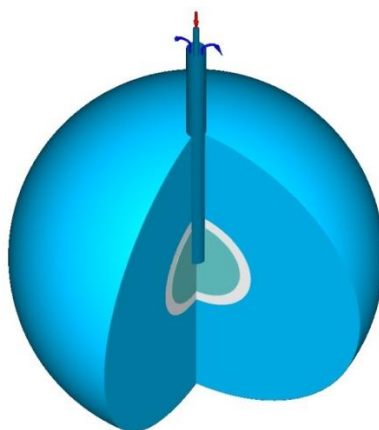
Kaip minėjau geros praktikos pavyzdys yra, kai perteklinės saulės energijos tiekama į gruntą. Parinktas šilumokaitis turi būt tinkamas ne tik šildymo sezonu veikiančiam šilumos siurbliui, bet ir vasaros metu regeneracijai. Prieš tai minėjau kelis pagrindinius šilumokaičių tipus

kurie naudojami vertikaliuose gręžiniuose. Kaip jau buvo minėta vienas iš jų yra „U“ formos šilumokaičiai, kurie efektyviausi, esant nedideliam temperatūrų skirtumui. Vamzdis vamzdyje šilumokaitis geriausiai veikia tuomet, kai cikliška arba pastoviai šilumos nešėjas kiekis dozuojamas į gręžinį. Kintant šilumokaičio tipui, kinta ir šilumos akumuliacija giluminiuose gruntuose. Kuomet naudojamas paprastas, susuktas šilumokaitis, kaip pavaizduota paveikslėlyje:



5.31 pav. Didelio paviršiaus šilumokaitis.

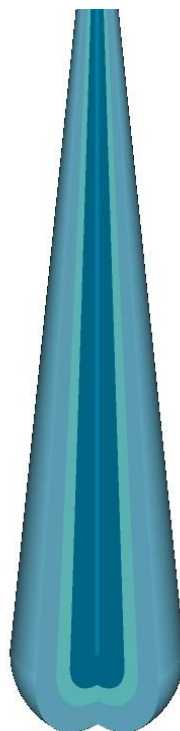
Gaunamas didelis paviršiaus plotas mažame tūryje, tuomet pagrindiniai mainai vyksta apačioje ir itin intensyviai. Tačiau šis šilumokaitis nėra tinkamas dėl savo didelės kainos, brangios gamybos ir didelių slėgio nuostoliu viduje. Tokios konstrukcijos šilumokaitis gruntą įšildo sferos forma, gręžinio pjūvį ir pasiskirstymą galima atvaizduoti kaip pateikta 5.27 paveiksle:



5.32 pav. Sferinis temperatūros pasiskirstymas.

Šiame paveikslėlyje parodyta kaip idealiai turėtų pasiskirstyti šiluma veikiant 5.31 pav. pavaizduotam šilumokaičiui. Tačiau gali atsirasti nedidelių nukrypimų dėl grunto nevienodumo ir netolygumo. Taip pat šis šilumokaitis dažniausiai naudojama nedideliuose gyliuose.

Mano pasirinktos konstrukcijos šilumokaičio vamzdis vamzdyje veikiančio pastoviai, šilumos pasiskirstymas grunte turētu atrodyti šitaip:

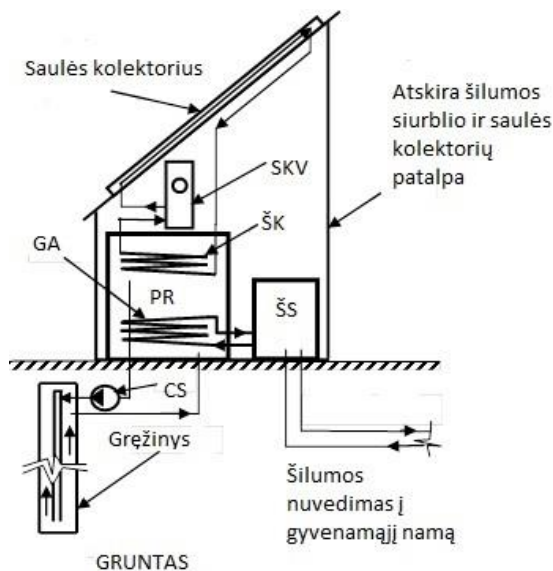


5.33 pav. Vamzdis vamzdyje šilumokaičio šilumos pasiskirstymas.

Tokį temperatūros pasiskirstymą lemia pati šilumokaičio konstrukcija, kuomet vidiniu vamzdžiu didesniu greičiu šilumnešis nugabenamas į šilumokaičio apačią, o pačiame žemiausiame taške jis išorine dalimi keliauja atgal į viršų. Todėl didžiausios temperatūros vanduo būna pačiame žemiausiame taške.

„u“ formos šilumokaitis šilumos kaupimui yra netinkamas, nes labiausiai įšildytu paviršinius sluoksnius, o dėl to išaugtu nuostoliai į aplinką. O grįžtantis šilumnešis vėl įkaistų nuo įtekančio. Dėl šios priežastie šis šilumokaičio tipas ir buvo atmestas.

Atlikus visos sistemos analizę ir darbus, visi komponentai buvo sujungti į vieną bendrą sistemą. Siekiant užtikrinti mažesnes išlaidas įrangai, akumuliacinė talpa buvo naudojama ta pati, tokiu atveju neprireikė papildomos akumuliacinės talpos ar šilumokaičio atskirai saulės kolektoriams. Atlikus visus modernizacijos darbus sistema pasipildė, papildoma saulės kolektorių sistema, kurią pateikiu 5.34 pav.

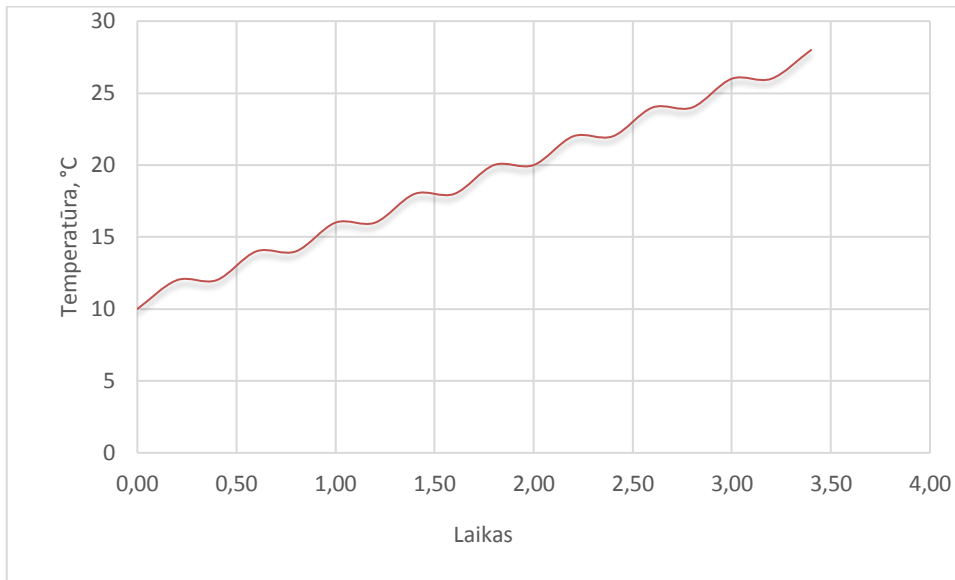


5.34pav. Šilumos siurblio su sezoniniu perteklinės saulės šilumos grąžinimu į gruntą sistema.

Pilnai sumontuota sistema su saulės kolektoriais ir valdymo sistema. Kurioje ŠS-šilumos siurblys, GA-garintuvas, CS-cirkuliacinis siurblys, PR-akumuliacinė talpa, SKV-saulės kolektorių valdiklis, ŠK-saulės kolektorių šilumokaitis. Visa vidaus sistema su saulės kolektoriais užpildyta propilenglikoliu, o šilumos siurblio sistema užpildyta R134a darbo agentu.

## 5.6. Eksploatacija

Taip pat labai svarbu suderinti ir nustatyti regeneracijos veikimą. Yra du pagrindiniai būdai: Pastovus ir cikliškas. Pastovus tai toks veikimas kuomet cirkuliacinis siurblys pastoviai veikia, kol iš saulės kolektorių pastoviai atiteka pašildytas vanduo, arba tol kol yra nustatytos temperatūros vanduo akumuliacinėje talpoje. Pastovus ir cikliniai veikimai turi savo plusų ir minusų pastovus veikimas maksimaliau išnaudoja šilumos mainus, reikia mažesnių sąnaudų į įrangą, paprastesnis valdymas. Tačiau išauga elektros sąnaudos dėl pastovaus siurblių veikimo. Cikliškas veikimas reikalauja didesnės investicijos į valdymo įrangą, sunkiau valdoma sistema, sistema reikalauja iš anksto nustatyto veikimo grafiko. Tačiau cikliškai veikiant sumažėja cirkuliacinio siurblio elektros sąnaudos. Įvertinus visus eksploatacijos sąlygas ir Lietuvos geografines savybes buvo nuspręsta pasirinkti ciklinį veikimą.



5.35 pav. Ciklinio veikimo kreivė.

Taip turėtu atrodyti įfėalus grunto temperatūros kitimo kreivė, viename taške, esant cikliniam veikimui. Pati sudėtingiausia dalis yra užtikrinti maksimalius šilumos mainus gruntiniame šilumokaityje tuo tikslu trumpinant nenaudingus stovėjimus susivienodinus temperatūroms. Tačiau tai išmatuoti ir nustatyti yra sunku todėl reikia laiko tarpą tarp ciklų privalu užsiduoti iš anksto.

Pirmieji du šilumos siurblio su saulės kolektoriais sistemos eksploatacijos metai pasirodė daug žadantys ir perspektyvūs grunto regeneracijoje. Pirmaisiais metais grunto regeneracija nebuvo pradėta iš karto pasibaigus šildymo sezonui, o tik prasidėjus vasaros laikotarpiui, per tą laiką pavyko prišildyti iki 15°C -16°C. Antri regeneracijos metai vyko 2014 metų vasarą, regeneracija buvo pradėta dar balandžio viduryje. Prieš pradėdant šildymo sezoną atlikus matavimus, rezultatai parodė, kad gruntą pavyko prišildyti iki 21°C. Prieš pradėdant regeneraciją, pasibaigus šildymo sezonui, grunto temperatūra ties šilumokaičiu siekė apie 0°C.

Ciklinis veikimas ir greiti šilumos mainai, sistemos efektyvumą padidiną iki 85% , palyginus su konvekcine sistema, kurios efektyvumas siekia tik 70%. Toks intensyvus ir greitas dviejų fluidų apkeitimas, užtikrina geresnį šilumos atidavimą iš papildomo rezervuaro į gręžinio tūrį. Dėl padidėjusių šilumos nuostolių, sumažėja ir bendras sistemos efektyvumas.

Paskaičiuoti ar sužinoti teorinį prišildyto grunto tūrį yra ganėtinai sudėtinga dėl didelio kiekio kintamųjų ir sistemos sudėtingumo, skaičiavimai atliekami matematiškais modeliuojant geoterminį šilumokaity. Kadangi ši sistema yra nauja, o mokslinių tyrimu beveik nėra, reikia pritaikyti turimas formules ir patikrinti su eksperimentiniais tyrimais. parametrai gali būt paskaičiuojami pasitelkiant formules.

Šilumos srautas grunte skaičiuojamas pasitelkus šią formulę:

$$H = \rho_a c_a \frac{(T - T_a)}{r_H} \quad (5.12)$$

Čia:  $\rho_a$  - grunto tankis [kg/m<sup>3</sup>].  $c_a$  - specifinė grunto šiluma [J/kg °C].  $T$  - grunto temperatūra [°C].  $T_a$  - šilumokaičio temperatūra [°C].  $r_H$  - šiluminė grunto varža [s/m].

Šis skaičiavimas yra paprastas ir tinkamas vietiniam šilumos srautui paskaičiuoti. Norint rasti viso šilumokaičio srauto kitimą įvairiuose gyliuose, bei nuotoliuose nuo šilumokaičio, šilumos srauto kitimo skaičiavimai atliekami diferencialinėmis lygtimis, kuomet gruntas suskirstomas į plonus grunto sluoksnius. Kuo grunto sluoksniai skaičiavimams parenkami plonesnis, tuo tikslesnis šilumos srautas paskaičiuojamas. Tačiau supaprastinant skaičiavimus galima pasinaudoti ir (5.14) formule.

Moksliniai tyrimai įrodė, kad šilumos kaupimas bet kokiame grunte, ar užkastame rezervuare, yra efektyvus ir naudingas būdas kaupti perteklinę šilumą. Tačiau sukauptos energijos per dieną prarandame apie 0,00154% viso sukaupto kiekio. Bet šis skaičius yra tik teorinis ir individualiu atveju gali skirtis.

Gruntinio šilumokaičio naudingumas šildymo sezono metu siekia 90%, temperatūrinis šilumokaičio efektyvumas, kaitinant gruntą skiriasi ir gali būt paskaičiuojamas pasitelkus šią formulę:

$$\eta_T = \frac{T_{iš} - T_f}{T_{iej} - T_f} = \frac{19 - 9}{26 - 9} = 0,588 \quad (5.13)$$

Iš skaičiavimų ir eksperimentų pateiktų duomenų galima daryti išvadą, kad šilumos akumuliacija yra efektyvus, o parinktas šilumokaičio tipas yra tinkamas abiem atvejais. Tačiau šis efektyvumas kinta kiekvieno ciklo metu, kintant temperatūroms.

### 5.7. Temperatūros pasiskirstymas grunte

Temperatūros plitimas grunte esant cikliniam gruntinio šilumokaičio veikimui, terminis sudrumstimas skaičiuojamas kaip temperatūros funkcija nuo laiko ir atstumo. Ši išraiška buvo pateikta [12], kuri atrodo sekančiai:

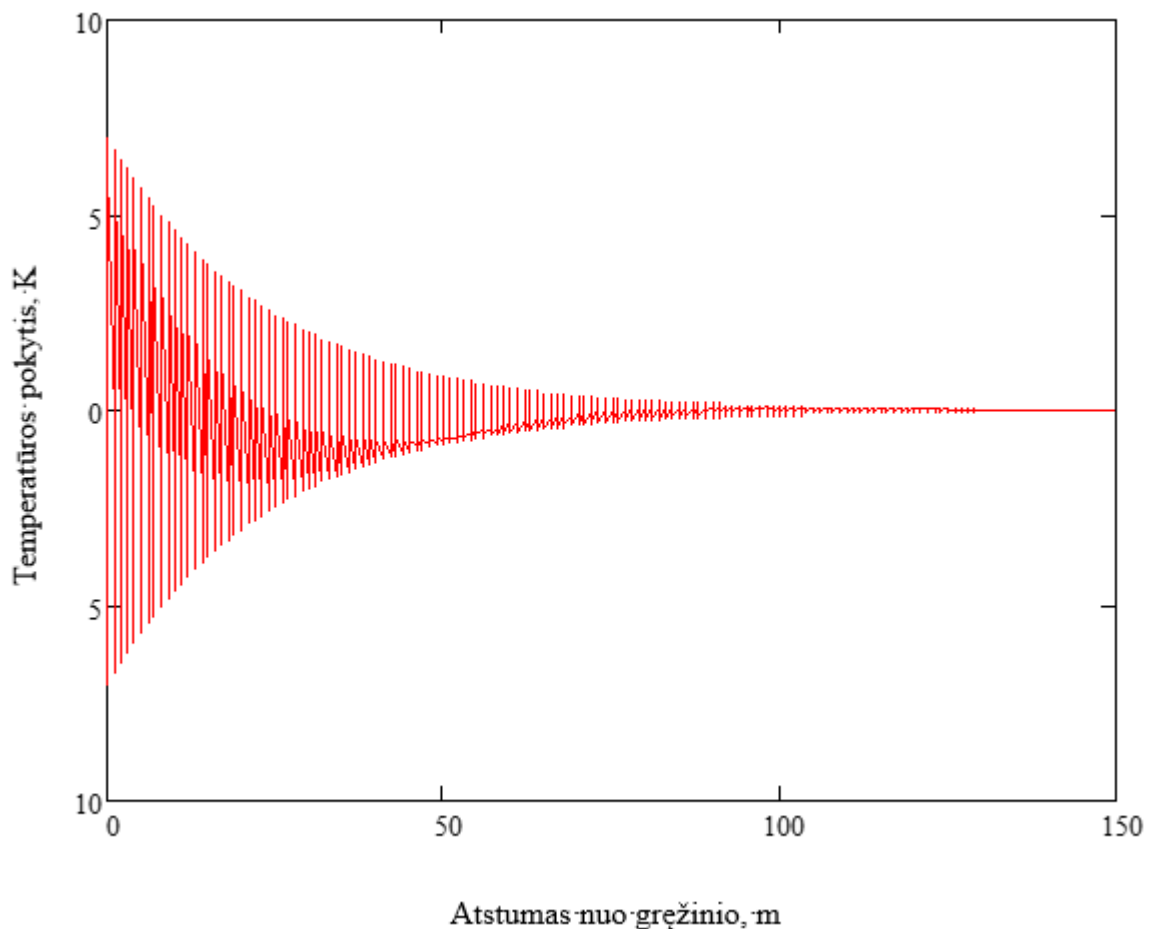
$$T(x, t) = T_1 e^{-\frac{x}{d_p}} \sin(2\pi \cdot t / t_p - x / d_p) \quad (5.14)$$



$$d_p = \sqrt{a \cdot t_p / \pi} \quad (5.15)$$

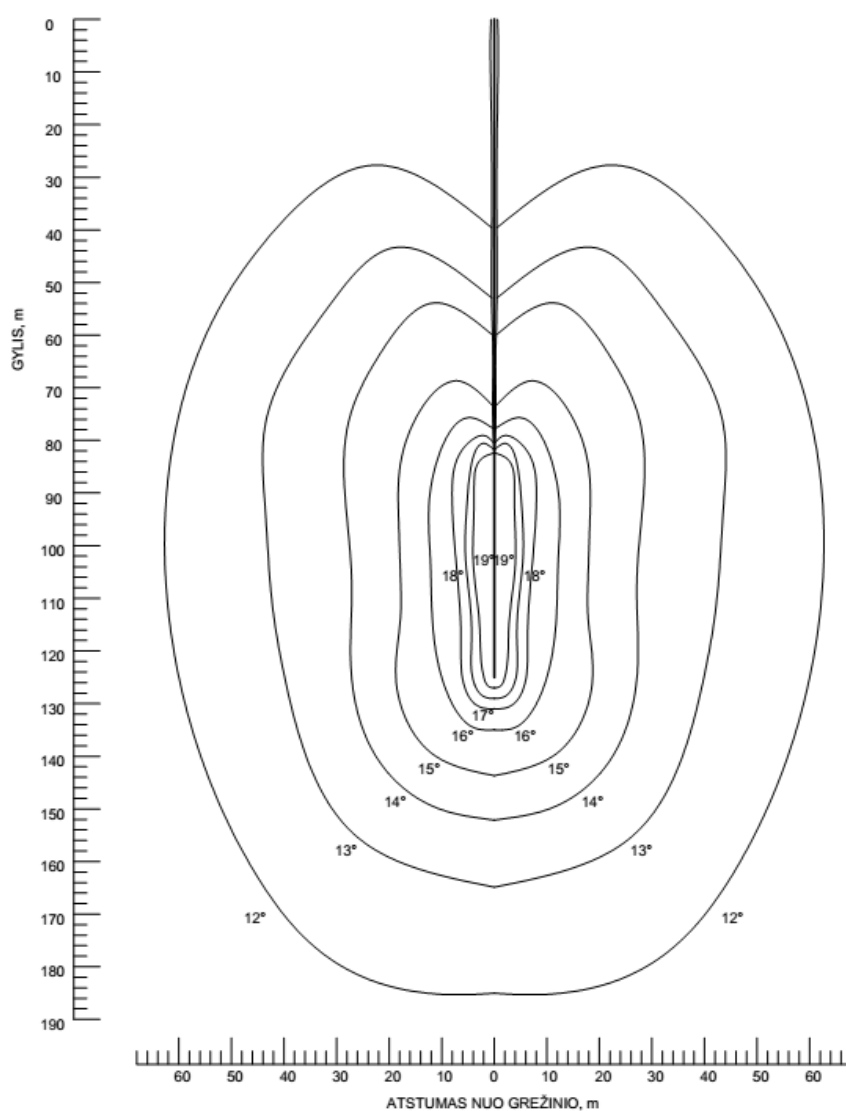
Čia:  $T_1$ -temperatūros amplitudė kurioje svyruoja mūsų tiekiamą temperatūrą kuomet  $x=0$  [°C];  $t_p$ -laiko periodas kuriuo vyksta šilumos mainai šilumokaityje [s];  $d_p$ -temperatūros skverbimosi gylis [m];  $a$ -šilumos laidumo koeficientas [ $m^2/s$ ].

Ši pateikta funkcija (5.14) nepriklauso nuo veikiamo ciklo tai yra ar gruntas yra šaldomas ar šildomas. Skaičiavimams buvo apsibrėžta riba aplink gręžinį - 150 m. Skaičiavimams pasirinkau žemiausią šilumokaičio tašką, kuriame teoriškai turėtų būti didžiausia temperatūra. Matavimo intervalas pasirinktas kas 1 metrą, taip gaunamas pakankamai tikslus temperatūros pasiskirstymas per visą ilgį. Vienas ir pats svarbiausias kriterijus yra laiko periodas, kuriuo vyksta šilumos mainai šilumokaityje. Šilumokaityje mainų laikas priklauso nuo saulės kolektorių veikimo laiko, vidutiniškai ciklas trunka apie 20 ir daugiau minučių, tai labai priklauso nuo saulės intensyvumo. Per metus Lietuvoje, Kauno apskrityje saulėtų dienų vidutiniškai būna apie 1444 valandų ne šildymo sezono metu. Įvertinę vidutinį ciklą kiekį per dieną ir jų dažnumą gaunamas grafikas:



5.36 pav. Temperatūros pokytis grunte tolstant nuo šilumokaičio.

Grafike rodomas temperatūros nukrypimas nuo nusistovėjusios natūralios temperatūros. Funkcija (5.13) yra universali tiek šildymui tiek šaldymui, kadangi įvedžiau temperatūros skirtumą tarp įeinančios ir išeinančios į šilumokaitį. Tačiau ji tinka tik cikliškai įkraunant šilumokaitį. Šiuo atveju, kuomet gruntas šildomas tokiu būdu, mes nevertiname grafiko dalies žemiau 0°C. Grafike matosi, kad prie šilumokaičio sienelės temperatūra siekia 7°C didesnė nei nusistovėjusi vidutinė. Tolstant nuo šilumokaičio temperatūra mažėja ir pasiekus apie 125 metrų nuotolį nuo šilumokaičio, temperatūros pokyčiai nebepastebimi ir tampa nykstamai maži. Esant 60 metrų atstumu nuo šilumokaičio temperatūra pakilus būna tik 1°C. Kadangi gruntas šildomas cikliškai, todėl šią išraišką ir grafiką tinka naudoti bet kurioje įkrovos vietoje. Taip pat šis grafikas gali koreguotis dėl ciklų kiekio ir jų dažnumo. Atlikus skaičiavimus ir pritaikius formules, gaunamas erdvinis tūris, kuriame pasiskirsto per visą sezoną sukaupta šiluma.

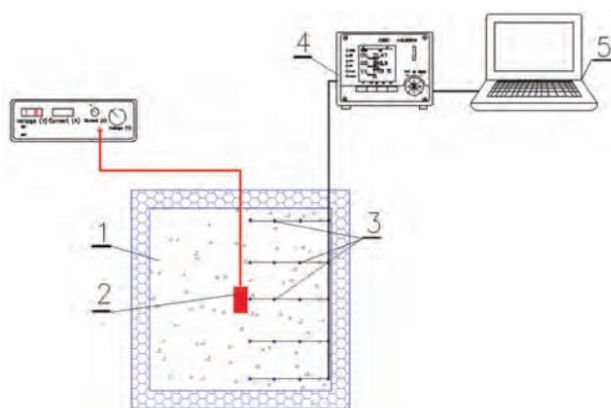


5.37 pav. Šilumos pasiskirstymas prieš pradėdant šildymo sezoną.

Grafike matosi kaip temperatūra prie šilumokaičio intensyviai keičiasi, tačiau tostant nuo jo tarpai didėja. Šis pateiktas paveikslas yra preliminarus ir taip turėtų atrodyti nesudrumsto vienalyčio grunto šildymas prieš šilumos siurblio paleidimą. Antrais regeneracijos metais teoriškai nebeturėtume gauti tokių idealių rezultatų, šilumos siurblio įtaka turėtų sumažinti šilumos įsiskverbimą. Tokių temperatūrų pasiskirstymą gaunam todėl, kad šilumokaitis veikia cikliškai ir visa šiluma yra nutransportuojama į gręžinio dugną. Viršutiniuose šilumokaičio sluoksniuose tokie nukrypimai gaunami kuomet atvėsęs vanduo pradeda tekėti atgal į akumuliacinę talpą, todėl čia temperatūra krenta, taip atsiranda šiluminiai nuostoliai.

### 5.8. Šilumos akumuliacijos eksperimentas

Grupė Slovakijos mokslininkų [27] atliko analogišką tyrimą su perteklinės saulės energijos panaudojimu šilumos akumuliacijai. Jie išsikėlė tikslą ištirti galimybę perteklinę energiją, gautą iš saulės kolektorių sukaupti grunte ir panaudoti šildymo sezonu. Vienintelis skirtumas kuriuo jų kurta sistema skiriasi nuo šios, tai kad jie viską atliko mažesnėmis sąlygomis su bandymais, kuriais papildė matematinį modeliavimą. Dėl sudėtingų matavimo sąlygų gilesniuose grunto sluoksniuose horizontalų gręžinį darė tik 5 metrų gylio. Tačiau pats svarbiausias skirtumas, jie atliko matematinį kompiuterinį modeliavimą Fluent programa. Ir visa tai palygino su pamatuotais laboratoriniais bandymais.



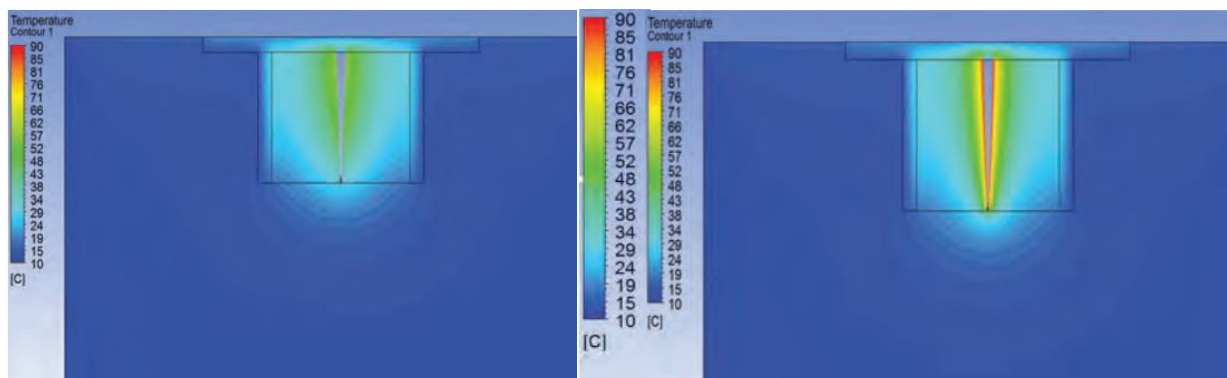
5.38 pav. Bandymo schema.

Čia: 1. Gruntas; 2. Šilumos šaltinis; 3. Termoporų sistema; 4. Dekodavimo sistema; 5. Kompiuteris.

Visas pasirengimas vyko sumažintame modulyje kaip gali veikti šilumos kaupimas. Visas matavimo modulis buvo izoliuotas nuo bet kokių išorės poveikių ir praradimų. Visa bandymų programa buvo atlieka su vienalytėmis ne homogeninėmis medžiagomis. Šio eksperimentinio tyrimo metu, buvo išbandyta keturių tipų dirvožemiai: Žvyras, smėlis, juodžemis ir molis, bei

kiekvienas su skirtingų drėgmės kiekiu. Visa gauta informacija buvo apdorota ir panaudota modeliavimui, bei sukurtas matematinis modelis.

Matematiniam modeliavimui parinko supaprastintą pagreitintą sistemą ir ganėtinai didelius parametrus, kuomet įkrovimas vyksta pastoviai 12 valandų pastoviai tiekiant vienodos temperatūros vandenį. O likusias 12 valandų gruntas paliekamas nusistovėjimui ir yra įjungiamas šilumos siurblys (vartotojas), ir taip kartojo 10 kartų.



5.39 pav. Šilumos pasiskirstymo rezultatai.

Atlikus modeliavimą su įvairiomis medžiagomis pateikė nuotraukas kaip atrodo sistema prieš paskutinį įkrovimą ir po jo. Kairėje esantis paveikslėlis parodo kaip sistema atrodo prieš įkrovimą, o dešinėje iš kart po įkrovimo. Neskaitant gruntinio šilumokaičio gylio ir temperatūros visa sistema buvo panaši. Todėl tikėtina, kad mūsų atveju būtų gauti panašūs rezultatai.

Jų sukurtas modelis parodė tendenciją, kad tokia sistema gali veikti kuomet šilumos nešėjas yra vanduo, nes buvo įrodyta, kad vidutinė temperatūra grunte palaipsniui tik didėja. Taip pat buvo pastebėta, kad net ir šilumos vartojimo metu, užsibrėžto tūrio grunto vidutinė temperatūra didėjo palaipsniui. Nors šis teigiamas šilumos pasiskirstymas ir poveikis silpnėja didėjant įkrovimo ciklų skaičiui, tačiau vis tiek išlieka tiesinės priklausomybės.

## 5.9. Saulės kolektorių ploto didinimas

Įvertinus anksčiau aptartus mokslininkų tyrimus, matavimus, prielaidas bei patirtį buvo nuspręsta atlikti papildomą modernizaciją jau esamai sistemai. Tuo tikslu buvo išsikelti keli pagrindiniai tikslai:

- Sukaupiti šilumos kiekius tenkinančius visą šildymo sezoną;
- Pakeisti propilenglikolį į vandenį;
- Padidinti saulės kolektorių plotą.

Pagrindiniai modernizacijos tikslas buvo šiltuoju metų laiku sukaupti reikiamus ir perteklinius šilumos kiekius šildymo sezonui, kuomet grunto temperatūra pakeliama tiek, kad pasibaigus šildymo sezonui, ji išliktu vis dar teigiama. Nes eksploatacijos metu buvo pastebėta, kad turimu saulės kolektorių kiekio nepakanka, ir esant šalčio atakoms grunto temperatūra priartėdavo nuliniai. Eliminavus šia užšalimo sąlygą būtų galima pilnai atsisakyti brangaus propilenglikolio, o visą sistemą užpildyti vandeniu ir taip atpiginti šilumokaičio eksploataciją. Tokios sistemos užpildymas propilenglikoliu gali siekti 4000 eurų, kas ir taip brangią sistemą pabrangina dar labiau. O atsiradus pratekėjimui į aplinką, kas kart vis reikia papildyti šią sistemą.

Atlikus skaičiavimus ir matavimus, buvo nuspręsta padidinti jau turimų saulės kolektorių plotą dvigubai. Prie sumontuotų 5 saulės kolektorių buvo pridėti papildomi dar 5, taip saulės kolektorių paviršiaus plotas padidėjo iki 25 kv. m naudingo ploto. Padidinus temperatūrą ir gaunamus šilumos kiekius grunto regeneracija paspartėjo, o sukaupti saulės energijos kiekiai padidėjo.

Pasinaudojus 5.25 grafiku buvo priimta prielaida, kad po kelių metų tokio šilumos kaupimo ir eksperimentiniu tyrimu bus galima pilnai įrodyti šios sistemos efektyvumą ir naudą. Taip pat bus įrodyta galimybė, kad vanduo galu būt naudojamas tokiose šilumos siurblio sistemose. Kadangi tokio tipo eksperimentiniai tyrimai trunka ilgai, ne vienerius metus, šis eksperimentas vis dar yra atliekamas ir sistema tik bandoma praktikoje. Šiuo metu ši padidinto saulės kolektorių sistema dar tik kaupia perteklinius saulės šilumos kiekius grunte. Ir tik pasibaigus ateinantiems šildymo sezonams bus galima daryti išvadas ar ši modernizacija pasiteisino ir skaičiavimai pasiteisino. Iki šiol atlikti matavimai rodo tendenciją į naudą ir atsipirkimą.

## IŠVADOS

Šiame tiriamajame eksperimentiniame darbe buvo atliktas individualaus namo šilumos siurblio ir sistemos analizė. Darbo metu buvo išsikelti pagrindiniai uždaviniai: grunto regeneracijos spartinimas, šilumnešio keitimas į vandenį, garintuvo tipo keitimas, perteklinės saulės energijos kaupimas.

Siekiant pakeisti sistemoje esantį propilenglikolį į vandenį prirėikė gaminti originalų garintuvą, kuris buvo paskaičiuotas pritaikytas ir pagamintas savitai šilumos siurblio ir saulės kolektoriaus sistemai. Garintuvo gamybai buvo pasirinktas tiesioginio plėtimosi gyvatukinis šilumokaitis, tokį pasirinkimą lėmė jo turimos savybės ir atsparumas apšalimui. Atlikus parenkamuosius skaičiavimus buvo nuspręsta padidinti paviršiaus plotą, taip nedidinant vidinio tūrio ir darbo agento kiekio. Paviršiaus ploto didinimui buvo pasirinkta briaunavimas, kuomet varinė viela standžiai apsukama aplink išorės paviršių. Taip pat pateikiama surinkimo ir gamybos technologiją su pavyzdžiais.

Pagrindinis šio darbo tikslas grunto regeneracija ir šilumos kaupimas vasaros metu. Buvo atlikti matavimai skaičiavimai, informacijos rinkimas ir aptarimas. Atlikti matavimai prieš ir po šildymo sezono, atlikti grunto matavimo rezultatų palyginimai. Pateikta ir aptarta grunto priverstinė regeneracija, gruntinių šilumokaičių tipai ir perteklinės energijos kaupimas grunte galimybės. Paskaičiuota gruntinio šilumokaičio galingumas ir naudingumas, bei šilumos praskverbimas į gruntą ir kiti pagrindiniai parametrai. O visa tai atlikta saulės kolektorių pagalba. Atlikus papildomus eksperimentinius tyrimus buvo nuspręsta dvigubai padidinti saulės kolektorių paviršiaus plotą.

1. Lietuvos ir kitų šaltesnio klimato kraštų sąlygomis oras kaip žemo potencialo šilumos šaltinis, neužtikrina efektyvaus šilumos siurblio darbo bei pakankamo pagaminamos šilumos kiekio net panaudojus vakuuminius kolektorius;
2. Darbe pristatoma originali šilumos siurblio ir Saulės kolektoriaus kombinacija užtikrinanti efektyvų ir našų šilumos gavimą, net šalčiausiais žiemos tarpsniais. Teoriniai ir eksperimentiniai sistemos tyrimai rodo, kad grunto šilumos regeneracija padidina šilumos siurblio efektyvumą 7-9 procentais (žiemą grunto temperatūra vidutiniškai 2-2.5°C aukštesnė).
3. Darbe atlikta šilumos siurblio garintuvų analizė parodė, kad pristatomai sistemai nėra tinkamų nusipirkti garintuvų. Sukurta ir pagaminta originali garintuvo konstrukcija

užtikrina efektyvius šilumos mainus ir tuo pačiu patikimą darbą itin didelio šiluminio apkrovimo sąlygomis.

4. Darbe pristatyta garintuvo šilumos mainų analizė parodė, kad darbo agento tekėjimo kanale tolygumas užtikrina, ne tik efektyvesnį garintuvo ploto išnaudojimą, bet ir vidutiniškai didesnį šilumos atidavimo koeficientą iš tekančio ir verdančio darbo agento pusės. Parodyta, kad skysčio plėvelės tekėjimas sukuria beveik tokio pat dydžio atidavimo koeficientą, kaip ir virimas.
5. Padidintas saulės kolektorių kiekis, kuris užtikrinta greitesnę grunto regeneraciją ir didesnius sukauptos energijos kiekius. Dėl šios priežasties vidutinė grunto temperatūra pakyla tiek, kad pasibaigus šildymo sezonui, aplink šilumokaitį išlieka vis dar teigiama. O esant daugiadieniems šalčio atakoms iš grunto visuomet atiteka bent 1-2°C temperatūros šilumnešis.

## Literatūra ir duomenų šaltiniai

1. J.H. Lienhard Iv, J. H. Lienhard V / A heat transfer textbook / Trečio leidimo, Phlogston press, Kembridžas, 2004, p 350-375.
2. Kompresorių veikimo parametrai . <http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/17/frcc.pc.021.a3.22-PSH051-077-mar2015.pdf>. (paskutinį kartą žiūrėta 2015-04-05).
- 3 K. Nakashita, S. Koyama / An experimental study on condensation of refrigerant R134a multiport extruded tube, International institute of refrigeration, Japonija, 2003.
- 4 K. Stephan / Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tubes / International journal of refrigeration, Čikaga, 2009.
- 5 F. Peru /Thermophysical properties of refrigerants: R134a / International institute of refrigeration Prancūzija, Paryžius, 1999.
6. M.J.Wilson and T. A. Newell / Refrigerant charge, pressure drop and condensation heat transfer in flattened tubes / International journal of refrigeration New York, 2003
7. G. Righetti, C. Zilio / Experimental Analysis of R134a and R1234ze(E) Flow Boiling Inside a Roll Bond Evaporator / International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 2014.
8. J. Lee, I. Mudawar / Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part I—pressure drop characteristics / International journal of heat and mass, West Lafayette, 2005.
9. E. Heisen, B. Ritter, R. Schrodin / operational implementation of the Multilayer soil model / Cosmos journal, Wetterdniest, Vokietija 2001.
10. B. Givoni / Cooled soil as a cooling source for buildings / International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, Santorini, Greece, 2005, p 515-519.
11. J. Putkonen / Soil thermal properties and heat transfer processes near NyAlesund, northwestern Spitsbergen, Svalbard / norsk polarinstituti, Vašingtonas, 1998, p 165-179.
12. C. Vadose / Soil temperature and heat flow / Unconn, Kopenhaga, 2004, p 309-316.
13. S. Brunold, R. Frey, U. Frei / A comparison of three different collectors for process heat applications/ Solartechnik Prüfung Forschung, Oberseestr, 2009.



14. Saulės kolektoriai ir jų testavimai. <http://www.echomaterico.net/blog/solar-collector-lab-test/> (paskutinį kartą žiūrėta 2015-04-30).
15. M.Mutlurk, R, Altindag, G.Turk / A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling / International journal of refrigeration Turkija, 2004. P 237-244.
16. V.V. Vasiliauskas Šaldymo sistemo Kaunas: Technologija, 2005, 105-120 p.
17. V.V. Vasiliauskas Šaldytuvai; Kaunas: Technologija, 2003, 115p
18. V.V. Vasiliauskas Šaldymo įrenginių montavimas ir remontas; Kunas: Techologija, 2003, 37-62p.
19. P Neuberger, R Adamovský, M Šed'ová - Temperatures heat flows in a soil enclosing a slinky horizontal heat exchanger. Department of Mechanicaland Engineering, Faculty of Engineering, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic, 2013.
20. Saulės kolektorių kampo nustatymas <http://solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html>
21. G.H. Martinus, M. Blesl, K.E.L. Smekens, P. Lako, M. Ohl, Technical and economic characterization of selected energy technologies. –IER. 2005.
22. Ronald DiPippo, Geothermal Power Plants. Principles, Applications and Case Studies, -Massachusetts, 2005.
23. Požeminės šiluminės energijos panaudojimo pastatų šildymui šalyje galimybių įvertinimas ir rekomendacijų dėl šios energijos panaudojimo minėties tikslams parengimas, Vykintas Šuksteris, Kaunas, 2007.
24. K. Nagano, T. Katsura, S. Takeda. Development of a desing and performance prediction tool for the ground source heat pump system. Applied Thermal Engineering 26 (2006), 1578 – 1592.
25. F. Zinkevicius, S. Sliupa, A. Mazintas, V. Dagilis. Geothermal energy use in Lithuania. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015
26. P.S. Doherty, S.Al-Hunhaili, S.B. Riffat, N. Abodahab. Ground source heat pump – description and preliminary results of the Eco House system. Applied Thermal Engineering 24 (2004), 2627-2641.
27. A. Kapjor, L. Daniel, M. Farbak, M. Gottwald. The accumulation and heat transfer in soil. 2014. University of Zilina, Slovakija.
28. P.K.Nag, Power Plant Engineering., (2002) Tata McGraw-Hill. (p.432).

29. Lietuvos temperatūriniai matavimai ir stebėjimai. <http://www.meteo.lt/lt/oro-temperatura>
30. Slėgio nuostolių skaičiavimas. <http://www.katmarsoftware.com/articles/pipe-fitting-pressure-drop.htm>
31. J.Juan. Heat loss of geothermal water through a pipeline. Lund University. Švedija. 2013.
32. L. Rybach, W. J. Eugester. Sustainability aspects of geothermal heat pumps. Polydynamics Engineering Zurich, 2002