



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

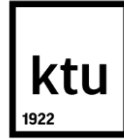
Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė

Baigiamasis magistro projektas

Vytautas Džiuvė
Projekto autorius

Prof. dr. Vytautas Dagilis
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė

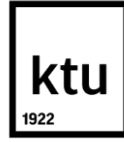
Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija 6211EX023

Vytautas Džiuvė
Projekto autorius

Prof. dr. Vytautas Dagilis
Vadovas

Dr. Raimondas Pabarčius
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vytautas Džiuvė

Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Vytauto Džiuvės*, baigiamasis projektas tema „*Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė*“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Studijų programa – Terminožinerija

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) – Vytautas Džiuvė

1. Baigiamojo projekto tema –

Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė

(Lietuvių kalba)

The Energy and Economic Analysis of the Seasonal Solar Energy Accumulation

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas: Atlikti novatoriškos sezoninės akumuliacinės talpyklos energetinę ir ekonominę analizę, ją pritaikant nedidelio miestelio šilumos poreikiams.

Uždaviniai: 1) Apskaičiuoti sezoninės talpyklos tūrį pagal nedidelio šilumos vartotojo poreikį; 2) Atlikti analizę, kaip priklauso talpyklos šilumos nuostoliai į aplinką bei išanalizuoti šoninių ir apatinių talpyklos paviršių šilumos nuostolius į gruntą; 3) Nustatyti priklausomybę tarp talpyklos tūrio, vartotojo šilumos poreikio ir saulės kolektorių ploto siekiant minimizuoti šilumos siurblio panaudojimo laiką; 4) Nustatyti talpyklos vandens temperatūrinės stratifikacijos priklausomybę nuo aukščio; 5) Atlikti saulės akumuliacinės šiluminės jėgainės techninę ekonominę analizę; 6) Pateikti išvadas akcentuojant minėtų jėgainių perspektyvines plėtros galimybes be finansinės paramos.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Darbo duomenys gauti atlikus mokslinės ir techninės literatūros analizę bei pasitelkiant konkretaus nedidelio miestelio su centralizuotu šilumos tiekimu energijos poreikį bei šilumos tiekimo specifiką.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Darbas turi atitikti magistriniam darbui keliamus reikalavimus, būti vykdomas sistemingai ir nuosekliai, prisilaikant aptarto darbo grafiko ir palaikant nuolatinius ryšius su vadovu.

Projekto autorius

Vytautas Džiuvė

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Vytautas Dagilis

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

Algimantas Balčius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Džiuvė Vytautas. Sezoninio saulės energijos kaupimo energetinė ir ekonominė analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Vytautas Dagilis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Saulės energija, akumuliacinė talpykla, šilumos siurblys, saulės kolektorius, žemos temperatūros šilumos tinklai.

Kaunas, 2019. 76 p.

Santrauka

Šiais laikais daugėjant mažai energijos vartojantiems pastatams, dažniausiai reikalingas ne aukštos temperatūros šilumnešis. Statant vis aukštesnės energetinio efektyvumo klasės pastatus, esamos termofikacinio vandens vamzdinių sistemų tampa nenašiomis ir per didelėmis. Šiai problemai spręsti jau daugelis užsienio valstybių pradėjo vystyti žemesnės temperatūros šilumos tinklus, kuriems esant užtikrinami naujų vartotojų poreikiai. Vienas aktualiausių ir energetiškai didelį potencialą turinčių energijos gamybos technologijų šiems žema–temperatūriniais šilumos tinklams yra sezoninis saulės energijos akumuliacija didelio tūrio požeminėse talpyklose. Plečiantis naujų pastatų kvartalams ir ieškant atsinaujinančios energijos gamybos plėtros galimybių Lietuvoje, šiame baigiamajame magistro darbe buvo pasirinktas Kauno rajone esantis miestelis – Akademija. Joje projektuojama novatoriška didelio tūrio sezoninė požeminė akumuliacinė talpykla integruota su saulės kolektoriais ir regeneracinio šilumos siurblio sistema bei taipogi atliekama energetinė ir ekonominė šio projekto analizė.

Suprojektuota 170000m³ daniško tipo akumuliacinė vandens talpykla. Ant akumuliacinės saugyklos stogo, 22500 m² plote suprojektuotas plokščiųjų saulės kolektorių laukas, kurių pagalba iš saulės energijos per 275 dienas būtų išgaunama 9980,4 MWh šilumos energijos (įskaitant šilumos nuostolius), kuri būtų naudojama akumuliacinės talpyklos vandens šildymui. Iš saulės kolektorių pašildyto grįžtančio vandens temperatūra būtų 70 °C. Naudojantis „ANSYS“ energijos modeliavimo programa sumodeliuotas akumuliacinės talpyklos temperatūros, greičio ir slėgio pasiskirstymas 2D pjūvyje, kuris vizuališkai parodė vykstančius viduje energijos virsmus. Iš apskaičiuotų rezultatų gavome, kad be paramos saulės akumuliacinė jėgainė neatsipirktų, tačiau pasinaudojus 50% ES lėšomis bei APVA fondų paramomis, investicijos atsipirktų per 10 metų. Įrengiant saulės kolektorių jėgainę ant akumuliacinės talpyklos, šilumos energijos pardavimo kaina su ES fondų parama būtų: 32,02 Eur/MWh, kuri leistų šiandieninėmis rinkos sąlygomis konkuruoti su kitais šilumos gamintojais.

Akumuliacinei sistemai pasirenkamas regeneracinis pramoninis šilumos siurblys, naudojantis amoniaką, kaip darbo agentą. Jis užtikrintų energijos poreikį gruodžio – vasario mėnesiais, kas sudarytų vidutiniškai 91 dieną ir pagamintų 2074,8 MWh šilumos energijos. Šilumos energiją gaminant šilumos siurbliu, energijos kaina vartotojams būtų 29 Eur/MWh, o sistemos atsipirkimas būtų per 9 metus, jei 50% investicijų padengtų ES lėšos. Iš viso sezoninėje akumuliacinėje talpykloje per metus būtų pagaminta 12055 MWh šilumos energijos, tai leistų užtikrinti dalį Akademijos miestelio šilumos poreikių, esant išplėtotiems žema–temperatūriniais tinklams.

Džiuvė Vytautas. The Energy and Economic Analysis of the Seasonal Solar Energy Accumulation. Master's Final Project / supervisor Vytautas Dagilis; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Key words: Solar energy, storage, heat pump, solar collector, low temperature heat networks.

Kaunas, 2019. 76 p.

Summary

Nowadays, increasing the low energy buildings, mostly is recommend to use for them a low temperature district heating water. The development of new buildings of higher energy efficiency class affects the existing district heating water pipeline systems which become inefficient and oversized. To solve this problem, many foreign countries have already begun to develop low temperature heat networks that could meet the needs of new consumers. One of the most relevant energy production technology for these low temperature heat networks is the seasonal accumulation of solar energy in high volume underground storage. With the increasing number of new buildings and the prospects for renewable energy development in Lithuania, the Academy, which is located in Kaunas, was selected for this final master's thesis. The innovative high volume seasonal underground storage tank was designed with integrated solar heating plant and the regenerative heat pump system, and implemented energy and economic analysis of this project.

In this project was modeled 170000m³ of volume Danish type accumulation storage (PTES). On the lid of the storage tank, was designed a field of flat solar collectors in the area of 22500 m². During the 275 days from solar energy, would be generating 9980.4 MWh of heat energy (including heat loss), which would be used to heat the storage tank water. The temperature of the return water heated from solar collectors would be 70 °C. With "ANSYS" energy simulation program for the accumulation storage was modeled the temperature, velocity and pressure distributions in the 2D section. We calculated that without the support, the solar heating plant would not have a payback period, but with 50% of EU or APVA funds, the investment would have a payback in 10 years. The sale price of heat energy with EU funds for the installed solar heating plant on a storage tank would be: 32,02 Eur/MWh, which would allow according today's market conditions to compete with other heat producers.

In this accumulation system, a regenerative industrial heat pump was used with ammonia as a working agent. This heat pump plant would ensure the energy demand between december and february - 91 days and produce 2074.8 MWh of heat energy. The sale price of energy for consumers from a heat pump plant would be 29 Eur/MWh, and the system's payback would be 9 years if 50% of the investment would be covered by EU funds. A total 12055 MWh of thermal energy would be produced per year in a seasonal accumulation storage, which would allow to provide part of the heat demand of the Academy town with developed low temperature networks.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslėlių sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Tikslas	13
2. Akumuliacinės sistemos plėtros poreikių analizė	13
2.1 Akademijos miestelio šilumos vartotojų skaičiaus nustatymas bei šilumos poreikio nustatymas	13
2.2 Klimatinių sąlygų nustatymas plėtojant ir kuriant naują jėgainę.....	14
2.3 Žema-temperatūriniai šilumos tinklai ir plėtros galimybės	15
3. Akumuliacinės sistemos energetinė - technologinė analizė.....	16
3.1 Pažangiųjų šilumos akumuliacinio saugyklių tipai.....	17
3.2 Cisternos tipo karšto vandens šilumos talpyklos (TTES).....	18
3.3 PIT tipo šilumos akumuliacinio talpyklos (PTES)	19
3.3.1 Šilumos energijos akumuliacinio palyginimas esant skirtingoms PIT talpyklų terpėms .	21
3.3.2 Terminė stratifikacija PIT akumuliacinėms talpykloms	22
3.3.3 PIT tipo akumuliacinių talpyklų įgyvendinti projektai	23
3.4 Gręžinių šilumos energijos akumuliacinio talpykla (BTES).....	24
3.5 Vandeningojo sluoksnio šilumos akumuliacinio saugykla (ATES).....	26
3.6 Saulės šilumos energijos kaupimas ir integracija su didelio tūrio PIT akumuliacinio talpykla	28
4. Saulės energijos potencialo panaudojimo galimybės	30
4.1 Saulės spinduliuotės prieinamumas	30
4.2 Šilumos energijos kaupimas iš plokščiųjų saulės kolektorių ir veikimo principas.....	31
4.3 Šilumos energijos kaupimas iš vakuuminių saulės kolektorių ir veikimo principas	32
4.4 Vakuuminių ir plokštelių saulės kolektorių palyginimas	33
4.5 Saulės kolektorių projektavimas ir energetinė analizė.....	34
4.5.1. Saulės kolektorių parinkimas	35
4.5.2 Saulės kolektorių projektavimas ir energetinė analizė.....	36
5. Šilumos akumuliacinio talpyklos projektavimas.....	43
5.1 Šilumos akumuliacinio talpyklos modeliavimas	44
5.2 PIT šilumos akumuliacinio talpyklos šilumos nuostolių nustatymas ir modeliavimas.	48
5.2.1 Šoninių ir apatinių talpyklos paviršių šilumos nuostolių į gruntą modeliavimas	50
6. Saulės akumuliacinio jėgainės ekonominiai skaičiavimai	53
6.1 Saulės kolektorių jėgainės integruotos su akumuliacinio talpykla investicijų apskaičiavimas	53

6.1.1 Saulės kolektorių žemės ploto investicijų apskaičiavimas.....	53
6.1.2 Saulės kolektorių kainos apskaičiavimas	53
6.1.3 Saulės kolektorių lauko įrengimo investicijų apskaičiavimas.....	54
6.1.4 Akumuliacinės talpyklos investicinių kaštų apskaičiavimas	54
6.1.5 Saulės jėgainės paleidimo – derinimo ir bendrųjų investicinių kaštų apskaičiavimas.....	55
6.2 Šilumos energijos kainos ir investicijų atsiperkamumo nustatymas saulės jėgainėje	56
7. Šilumos siurblio integravimas didelio tūrio požeminėje akumuliacinėje talpykloje.....	61
7.1 Šilumos siurblio veikimo principas	61
7.2 Amoniakinių pramoninių šilumos siurblių sistemos	62
7.3 Šilumos siurblių energijos efektyvumas naudojant amoniaką.....	64
7.4 Regeneracinio vienpakopio šilumos siurblio ciklo be peraušinimo ir su peraušinimu analizė	64
7.5 Pramoninio šilumos siurblio parinkimas ir technologinė analizė.....	67
7.5.1.Pramoninio šilumos siurblio aplinkosauginė nauda.....	68
7.6 Akumuliacinės talpyklos integruotos su šilumos siurbliu modeliavimas.....	68
8. Šilumos siurblio jėgainės energetinė – ekonominė analizė	70
8.1 Investicijų atsipirkimo skaičiavimas.....	72
Išvados	74
Literatūra	75

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Saulės spinduliuotė į plokščiąjį paviršių	14
3.1 lentelė Šilumos akumuliacinių talpyklų koncepcijų palyginimas	17
3.2 lentelė Pagrindiniai parametrai BTES tipo akumuliacinėms talpykloms.....	26
4.1 lentelė. Vakuuminių ir plokštelių saulės kolektorių palyginimas	33
4.2 lentelė. Saulės kolektorių parinkimas	35
4.3 lentelė. Plokščiųjų saulės kolektorių šilumos energijos gamyba per metus, MWh	38
4.4 lentelė. Plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumo rodikliai	39
5.1 lentelė. Šilumos nuostoliai nuo PIT talpyklos viršutiniojo plaukiojančio dangčio.....	49
6.1 lentelė. Investicijų poreikio skaičiavimas	55
6.2 lentelė. Projekto atsipirkimo laikas, be papildomų ES lėšų bei APVA fondų paramos	58
6.3 lentelė. Projekto atsipirkimo laikas, be papildomų ES lėšų bei APVA fondų paramos	59
6.4 lentelė. Ekonominių- energetinių rodiklių nustatymas	60
7.1 lentelė. Šaldymo agento R717 reikalingi grafiko taškai, skaičiavimams atlikti	64
7.2 lentelė. Šaldymo agento R717 reikalingi grafiko taškai, skaičiavimams atlikti	66
7.3 lentelė. Šilumos siurblio techninė charakteristika.....	67
8.1 lentelė. Šilumos siurblio investicijų atsipirkimo skaičiavimas	73

Paveikslėlių sąrašas

2.1 pav. Akademijos miestelio centralizuotai tiekiamos energijos šilumos tinklų schema.....	13
2.2 pav. Akademijos miestelio centralizuotai tiekiamos energijos šilumos tinklų schemos tęsinys	13
2.3 pav. Žema-temperatūrinių šilumos tinklų tiekiamojo ir grįžtamojo termofikacinio vandens temperatūriniai diapazonai.....	14
3.1 pav. Cisternos tipo karšto vandens šilumos talpyklos (TTES)	19
3.2 pav. TTES talpyklos integravimas į esamą kalvą, išsaugant kraštovaizdį.....	19
3.3 pav. PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos pavyzdys	20
3.4 pav. Vokiško tipo PIT akumuliacinė talpykla.....	20
3.5 pav. Daniško tipo PIT akumuliacinė talpykla.....	20
3.6 pav. Tiesioginis (kairėje) ir netiesioginis (dešinėje) šilumos energijos kaupimas.....	21
3.7 pav. Termiškai stratifikuotos talpyklos pavyzdys	22
3.8 pav. Marstal projektas Danijoje	23
3.9 pav. Dronninglund projektas Danijoje	23
3.10 Pav. Vojens projektas Danijoje	23
3.11 Pav. Gram projektas Danijoje	23
3.12 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos sandara.....	24
3.13 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos skerspjūvis	25
3.14 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos vertikalus skerspjūvis ir sandara....	25
3.15 pav. Vandeningo sluoksnio šilumos akumuliacinė talpykla	26
3.16 pav. Vandeningo sluoksnio šilumos akumuliacinės talpyklos vertikalus skerspjūvis	27
3.17 pav. Rostock ATES akumuliacinės sistemos techninė koncepcija	27
3.18 pav. Akumuliacinės sistemos integracija su saulės kolektoriais ir regeneraciniu šilumos siurbliu.....	28
3.19 pav. Technologinė schema.....	29
4.1 pav. Vidutinė metinė saulės apšvieta (kWh/m ²) Europos valstybėse ant horizontalaus pav.	30
4.2 pav. Vidutinė metinė saulės apšvieta (kWh/m ²) Lietuvoje ant horizontalaus paviršiaus	31
4.3 pav. Plokščiojo saulės kolektoriaus sandara	31
4.4 pav. Plokštelinis saulės kolektorius su konvekcinio barjeru ir be jo	32
4.5 pav. Vakuuminiai saulės kolektoriai atskiro ir tiesioginio veikimo.....	33
4.6 pav. Saulės kolektorių efektyvumo palyginimas	33
4.7 pav. Metinio saulės energijos pajėgumo Q (kWh/m ²) priklausomybė nuo vid. temp. (T _m)	34
4.8 pav. Saulės kolektorių įrengto parko Danijoje pavyzdys.....	35
4.9 pav. Plokščiasis saulės kolektorius VITOSOL 100- w.2.5	36
4.10 pav. Saulės spinduliuotė į pasvirusį paviršių Kauno rajone.....	39
4.11 pav. Saulės kolektorių efektyvumas skirtingais metų mėnesiais	40
4.12 pav. Saulės kolektorių šilumos energijos gamyba, MWh/mėn.....	40
4.13 pav. Vamzdynų (tiekiamojo ir grįžtamojo) šilumos nuostoliai (1km) tarp kolektoriaus lauko ir centralizuoto šildymo tinklo prijungimo taško	41
4.14 pav. Projektuojamas plokščiųjų saulės kolektorių laukas	41
4.15 pav. Suprojektuotas saulės kolektorių laukas ant akumuliacinės talpyklos.....	42
4.16 pav. Suprojektuoto saulės kolektorių lauko integraciją į Akademijos miestelio CŠT sistemą. 42	

5.1 pav.	Projektuojamos PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos konstrukcijos skerspjūvis...	43
5.2 pav.	Projektuojamos šilumos akumuliacinės talpyklos energetiniai srautai	43
5.3 pav.	Projektuojamos šilumos akumuliacinės talpyklos 3D vaizdas su srautų kryptimis	44
5.4 pav.	Akumuliacinės talpyklos principinė schema	44
5.5 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos programinis vandens srautų krypčių nustatymas	45
5.6 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas	45
5.7 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinio pasiskirstymo brėžinys.....	46
5.8 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymo brėžinys	46
5.9 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymas vandens purškimo zonose	47
5.10 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio slėgių pasiskirstymo brėžinys.....	47
5.11 pav.	Akumuliacinės vandens talpyklos ir aplink ją esančio grunto 2D modelis.....	48
5.12 pav.	Vertikalusis grunto temperatūros pasiskirstymas aplink PIT talpyklą (kairėje: šoninis ir apatinis paviršius, dešinėje: padidintas vaizdas iš viršutinio talpyklos kampo	50
5.13 pav.	Šilumos perdavimo koeficientas gruntui	51
5.14 pav.	Grunto temperatūrinis pasiskirstymas	51
6.1 pav.	Apytikslės saulės kolektorių lauko įrengimo sąnaudos Eur/m ² įskaitant vamzdinius, šilumokaičių įrenginius, darbinį fluidą ir kitą reikalingą įrangą	54
6.2 pav.	Apytikslė PIT akumuliacinių talpyklų kaina pagal atitinkamą tūrį.....	55
7.1 pav.	Šilumos siurblio integracija į akumuliacinę talpyklą	61
7.2 pav.	Garinė kompresorinė šilumos siurblio sistema	62
7.3 pav.	Šilumos siurblio p-h diagrama	62
7.4 pav.	Amoniako sočiųjų garų slėgio kreivė	63
7.5 pav.	Amoniako Log p-h diagrama esant skirtingoms kondensacijos temperatūroms.....	63
7.6 pav.	Dviejų pakopų amoniako šilumos siurblio ciklas.....	64
7.7 pav.	Regeneracinio šilumos siurblio ciklas be peraušinimo	65
7.8 pav.	Regeneracinio šilumos siurblio ciklas su peraušinimu.....	66
7.9 pav.	„Neatpump“ pramoninis šilumos siurblys.....	67
7.10 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos energijos srautai integravus šilumos siurblių.....	68
7.11 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas	68
7.12 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas	69
7.13 pav.	PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymas	69

Įvadas

Šiandien vis daugiau kalbama apie efektyvią darniąją energijos gamybą, atsinaujinančios energijos technologijų – saulės kolektorių bei modulių panaudojimą, šilumos siurblių integraciją, vis daugiau dėmesio skiriama aplinkosaugai – ekologijai ir patogiam žmogaus gyvenimui. Žinoma, šie alternatyvūs šilumos bei elektros gamybos būdai nėra vien tik duoklė gamtai, pirmiausia jų populiarumą lemia ekonomiškumas, efektyvumas ir energetinė nauda. Vis didesnę susidomėjimą ir patrauklumą kelia daugelio užsienio valstybių didmiesčiuose vyraujančio žema – temperatūrinio centralizuoto energijos tiekimo pavyzdžiai. Statant vis aukštesnės energetinio efektyvumo klasės pastatus, esamos termofikato vamzdinių sistemos tampa nenašiomis ir per didelėmis. Šiai problemai spręsti pradedami vystyti žemesnės temperatūros šilumos tinklai. Šiems tinklams šilumos energija gali būti gaminama pačiais įvairiausiai atsinaujinančių išteklių būdais, tačiau vienas aktualiausių ir energetiškai didelį potencialą turinčių technologijų yra saulės energijos panaudojimas šilumos akumuliacijai. Šilumos akumuliacinės sistemos centralizuotos energijos tinklams šiais laikais tampa vis labiau svarbios, kadangi neretai vyrauja energijos gamybos svyravimai, vyksta nuolatinė nepriklausomų energijos gamintojų konkurencija, todėl dėl nepastovaus energijos poreikio, pagamintas šilumos energijos kiekis būna per didelis, energijos pasiūla viršija paklausą. Šiai problemai spręsti daugelyje užsienio valstybių jau yra dažnai naudojamos didelio tūrio energijos kaupimo – akumuliacinio talpyklos, padedančios sukaupti papildomus energijos resursus. Labai dažnai į šias akumuliacines talpyklas integruojamos saulės kolektorių bei šilumos siurblių sistemos, pagaminančios didelius šilumos energijos kiekius įvairių miestų ir miestelių šilumos vartotojams.

Šiame baigiamajame magistro projekte bus pristatyta ir išanalizuota novatoriška sezoninė saulės energijos akumuliacinio sistemos, naudojanti saulės kolektorių ir šilumos siurblių didelio tūrio akumuliacinio talpyklos vandens pašildymui, kuris būtų tiekiamas nedideliui miesteliui – žemos temperatūros šilumos poreikiams užtikrinti.

1. Tikslas

Šio baigiamojo magistro projekto tikslas: atlikti novatoriškos sezoninės akumuliacinės talpyklos energetinę ir ekonominę analizę, ją pritaikant nedidelio miestelio šilumos poreikiams.

Uždaviniai:

- Atlikti pažangiųjų sezoninių šilumos akumuliacinio saugyklų literatūrinę analizę, parodant PIT požeminių talpyklų technologinį ir ekonominį pranašumą.
- Išanalizuoti saulės energijos potencialo panaudojimo galimybes.
- Parinkti ir suprojektuoti plokščiuosius saulės kolektorius ant akumuliacinės talpyklos bei atlikti energetinę analizę.
- Suprojektuoti požeminę akumuliacinę talpyklą bei sumodeliuoti joje temperatūrų pasiskirstymą dėl stratifikacijos.
- Nustatyti bei sumodeliuoti šilumos akumuliacinės talpyklos šilumos nuostolius į aplinką.
- Atlikti saulės akumuliacinės jėgainės ekonominius - investicinius skaičiavimus.
- Atlikti šilumos siurblio jėgainės energetinę ir ekonominę analizę.

2. Akumuliacinės sistemos plėtros poreikių analizė

2.1 Akademijos miestelio šilumos vartotojų skaičiaus nustatymas bei šilumos poreikio nustatymas

Šiame baigiamajame projekte analizuojame Kauno rajone esantį miestelį – Akademią.

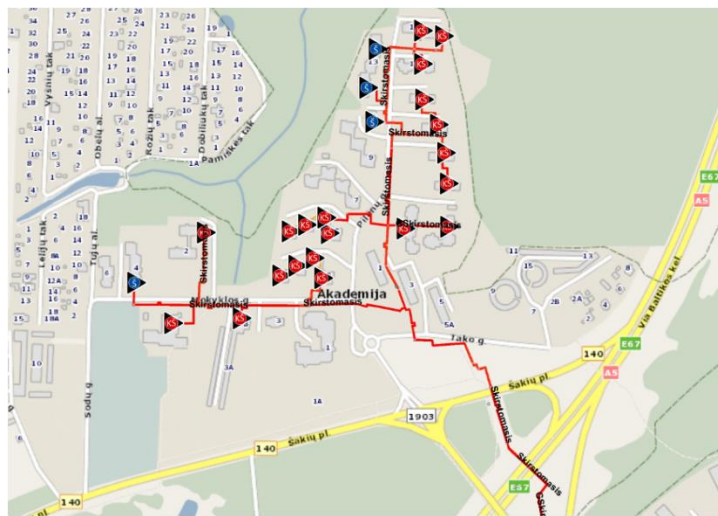
- Žinome, kad šiame miestelyje gyvena 2807 gyventojų.
- Miestelio šilumos vartotojų skaičius: 42 visuomeniniai ir gyvenamieji pastatai.
- Vidutiniškai per metus reikalingas šildymui ir karštam vandeniui šilumos kiekis – 13965 MWh (Duomenys pastarųjų 3 metų iš AB Kauno Energija).
- Esama situacija – Noreikiškių katilinėje dirbantis 4 MW biokuro vandens šildymo katilas su 1 MW galios kondensaciniu ekonomizeriu. Per 2015-2017-uosius metus Noreikiškių katilinė pagamino 41 897 MWh šilumos energijos. Iš šio kiekio biokuru buvo pagaminta 29 190 MWh šilumos energijos, o gamtinėmis dujomis – 12 706 MWh. Dujiniai katilai daugiausiai buvo naudojami nešildymo sezono laikotarpiu, kuomet šilumos poreikis nukrisdavo žemiau esančio biokuro katilo minimalios apkrovos ribos.

Siūloma ateities papildoma alternatyva – sezoninės požeminės šilumos akumuliacinės talpyklos (PIT) įrengimas šilumą kaupiant iš saulės energijos panaudojant saulės kolektorius, o šaltuoju metų periodu naudojant regeneracinį kompresorinį šilumos siurblį. Šilumos siurblio jėginei elektros energija galėtų būti užtikrinama elektrą generuojant iš saulės modulių arba panaudojant šiuolaikinius PVT modulius. Atsižvelgiant į plečiamus biokuro šilumos pajėgumus Kauno rajone, priimame, kad ši naujos technologijos šilumos akumuliacinė jėgainė galėtų užtikrinti 12000 MWh šilumos poreikį miestelio vartotojams.

Ši akumuliacinė talpykla galėtų prisidėti dalinai prie centralizuotai tiekiamos energijos miestelio vartotojams, jeigu būtų naudojami žema – temperatūriniai šilumos tinklai, kuriuose tiekiamojo termofikacinio vandens temperatūra būtų apie 60 – 70 °C.



2.1 pav. Akademijos miestelio centralizuotai tiekiamos energijos šilumos tinklų schema



2.2 pav. Akademijos miestelio centralizuotai tiekiamos energijos šilumos tinklų schemos tęsinys

2.2 Klimatinių sąlygų nustatymas plėtojant ir kuriant naują jėgainę

Kadangi planuojama projektuoti naują jėgainę Kauno r. Akademijos miestelyje yra taikomas klimatinių sąlygų nustatymas pagal daugiametę vidutinę pilnutinę saulės ekspoziciją kWh/m², tenkančią horizontaliam paviršiui kiekvieną mėnesį. Pastebime, kad Kauno rajone vidutiniškai iš saulės per metus būtų galima sukaupti 974 kWh/m².

2.1 lentelė. Saulės spinduliuotė į plokščiąjį paviršių

Saulės spinduliuotė į plokščiąjį paviršių, kWh/m ²													
Vietovė	1 mėn.	2 mėn.	3 mėn.	4 mėn.	5 mėn.	6 mėn.	7 mėn.	8 mėn.	9 mėn.	10 mėn.	11 mėn.	12 mėn.	Per met.
Kauno r.	16	33	70	99	146	155	150	138	90	52	16	9	974

Taip pat buvo atlikti skaičiavimai nagrinėjant dienų skaičius su skirtinga vidutine paros oro temperatūra (°C) gruodžio – kovo mėnesiais pagal gautus 2005 – 2019 m. Kauno meteorologinius duomenis. Ištyrę bei išnaginę šiuos duomenis sužinojome, kad per visus metus prireiktų 91 dienos,

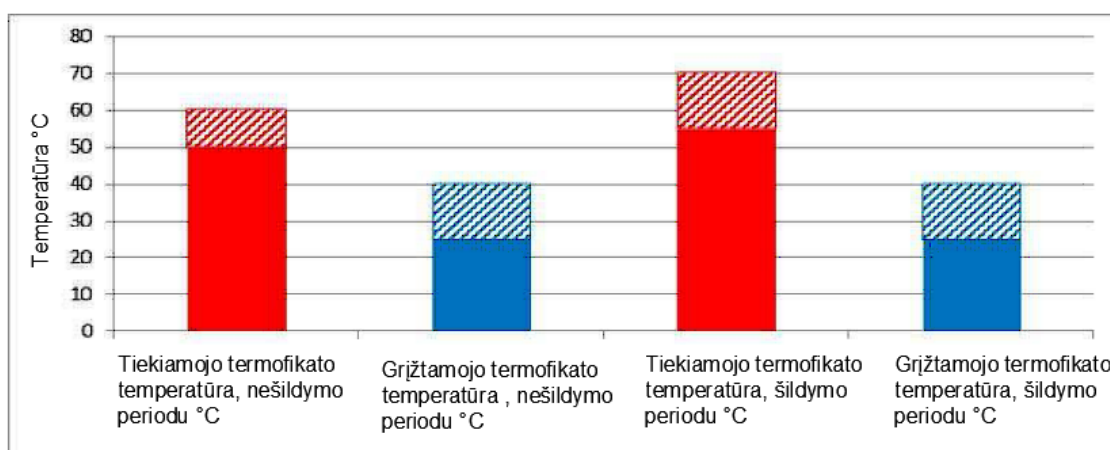
kuomet projektuojamai naujai jėgainei reiktų naudoti šilumos siurblių. Likusiomis dienomis šiluma būtų kaupiama iš saulės kolektorių požeminei šilumos akumuliacinei talpyklai.

Kadangi akumuliacinei saugykiai šildymo sezono metu šilumos siurblio reiktų tik 91 dienai, tai leistų užtikrinti stabilų 70 laipsnių palaikymą vandens šildymui talpykloje, kadangi iš saulės kolektorių generuojamos saulės šilumos neužtektų.

2.3 Žema-temperatūriniai šilumos tinklai ir plėtros galimybės

Žemos temperatūros centralizuotas šildymas yra šilumos tiekimo technologija, skirta efektyviam, ekologiškam ir ekonomiškam bendruomenės šilumos energijos aprūpinimui. Tradiciškai centralizuoto šildymo tinklai veikia iki 100 °C temperatūros, todėl paprastai priimta vadinti 3-osios kartos centralizuotu šilumos energijos tiekimu. Lyginant su įprastiniu centralizuotu šildymu, žemos temperatūros centralizuotame šildyme tinklo tiekimo temperatūra sumažinama iki maždaug 60 – 70 °C ar dar mažesnio temperatūros lygio, vadinamo 4-osios kartos centralizuoto šilumos energijos tiekimu. Šie žema-temperatūriniai šilumos tinklai gali sumažinti tinklo šilumos nuostolius iki 75% [1].

Įgyvendinant Europos Sąjungos šilumos energijos efektyvaus vartojimo direktyvas, pažangiosios šiaurės šalys sparčiai pradėjo taupyti energiją pastatuose. Kaskart vis daugėja atvejų, kuomet dabartinės termofikacinio vandens vamzdynų sistemos tampa per didelėmis ir nenašiomis. Tam ruošiamasi ir ši problema sprendžiama dviem pagrindiniais būdais: stengiamasi prijungti prie centralizuotos šilumos tiekimo sistemų daugiau naujų vartotojų arba atsilaisvinusiam vamzdynų pralaidumui panaudoti šilumą, perduodamą didesnio debito, tačiau žemesnės temperatūros šilumnešių. Taip mažinami šilumos perdavimo nuostoliai CŠT vamzdynuose ir geriau panaudojami esami įrenginiai – mažesnės tiekimo sąnaudos. Žemos temperatūros centralizuoto šilumos tiekimo sistema gali veikti nuo 50 – 55 °C iki 60 – 70 °C tiekiamosios ir 25 – 30 °C iki 40 °C grįžtamosios temperatūros diapazonuose. Šiuos temperatūrinius pokyčius iliustruoja (2.3 pav.).



2.3 pav. Žema-temperatūrinių šilumos tinklų tiekiamojo ir grįžtamojo termofikacinio vandens temperatūriniai diapazonai

Žema – temperatūrinė centralizuoto šilumos tiekimo sistema atitinka du pagrindinius energetikos sektoriaus reikalavimus: aukštą energijos vartojimo efektyvumą ir atsinaujinančios energetikos vartojimo plėtrą. Pagrindiniai privalumai šioms šilumos tiekimo sistemoms [2]:

- Pirmiausia užtikrinamas energijos tiekimo efektyvumas ir pritaikymas naujos statybos pastatams. Naujų ir renovuotų pastatų energinio naudingumo reikalavimai palaipsniui tampa vis mažesni, energijos suvartojimas mažėja. Geresnis pastatų energinis naudingumas leidžia užtikrinti žemos temperatūros centralizuoto šilumos tiekimo galimybes. Dar svarbiau, kad centralizuoto šilumos tiekimo nuostoliai gali būti gerokai sumažinti mažinant tinklo temperatūrą. Tai padidina centralizuoto šildymo sistemų pasiūlos efektyvumą ir konkurencingumą tiekiant energiją į mažai energijos naudojančius pastatus.
- Kitas svarbus žemos temperatūros centralizuoto šildymo pranašumas yra padidėjęs atsinaujinančios energijos ir žema-temperatūrinių išteklių panaudojimo potencialas. Žemos temperatūros atsinaujinančių energijos išteklių įrenginiai, tokie kaip saulės kolektoriai, PVT moduliai centralizuotame šilumos tiekime galėtų sudaryti didelę įtaką bei prisidėti prie papildomos energijos generavimo. Esant žemoms temperatūroms tuo pačiu būtų didinamas ir saulės kolektorių efektyvumas tiek įrenginėjant ant žemės paviršiaus, tiek įrengiant ant pastato stogų konstrukcijų.
- Spartesnė šilumos siurblių integraciją į šilumos tinklus. Nepriklausomai nuo generuojamo šilumos šaltinio, kuo žemesnė centralizuoto šilumos tiekimo temperatūra, tuo didesnis šilumos siurblių efektyvumas. Žema šilumos tiekimo temperatūra atveria platesnį šilumos siurblio technologijų spektrą.
- Spartesnė perteklinės šilumos atgavimo technologija. Pramonės procesų atliekinės šilumos panaudojimas arba šilumos atgavimas iš aušinimo procesų yra geresnis ir pigesnis esant mažesnei centralizuoto šilumos tiekimo temperatūrai.
- Efektyvesnė dūmuose esančio vandens garo kondensacija. Žema šilumos tinklo grąžinimo temperatūra padidina dūmų kondensacijos galimybę. Tai ypač aktualu biomasės ir atliekų deginimo įrenginiams dėl didelio drėgmės kiekio kure.
- Galiausiai, mažesnė temperatūra centralizuoto šilumos tiekimo tinkle sumažina vamzdynų šilumos nuostolius. Sumažėjus tiekimo temperatūrai, sumažėja netolygiai paskirstytos temperatūros vamzdyne. Todėl sumažėja vamzdynuose šilumos nuostoliai ir kitos susijusios priežiūros išlaidos. Be to, sumažinti nuostoliai taip pat pailgina šilumos tinklo eksploatavimo laiką.

Žemos temperatūros centralizuotas šildymas yra technologija, leidžianti didinti atsinaujinančių ir atliekinių energijos šaltinių integravimą šildymui ir vėsinimui. Tai padeda siekti nacionalinių aplinkosaugos taršos mažinimo tikslų.

3. Akumuliacinės sistemos energetinė – technologinė analizė

Paprastai pagal skirtingą kaupimo – akumuliacinio būdą, šilumos energijos saugojimas būna trijų tipų: pažangusis šilumos saugojimas, latentinis arba fazinių virsmų šilumos saugojimas ir termocheminis šilumos saugojimas [3].

Kalbant apie pažangiojo šilumos akumuliacinio koncepciją, ji yra grindžiama principu, kad energija saugoma kietoje arba skystoje būsenoje, kuri keičia tik temperatūrą, bet ne jos fazę bei cheminių reakcijų neatsiranda. Tipiškos medžiagos, naudojamos pažangiam šilumos saugojimui, yra skysčiai: tokie kaip vanduo, šilumos perdavimo alyvos ir išlydytų druskų rūšys. Kietų medžiagų pavyzdžiai galėtų būti: betonai, akmenys, granitas, uolos, žemė ir tt. Pažangusis šilumos akumuliacinis yra komerciniu požiūriu pats parankiausias šilumos energijos kaupimo tipas. Jis naudojamas tiek mažos

apimties gyvenamosioms, tiek didesnėms komercinėms, pramoninėms ir centralizuoto šildymo sistemoms [3].

3.1 Pažangiųjų šilumos akumuliacinio saugyklų tipai

Pažangiosios šilumos akumuliacinės talpyklos yra skirstomos į tris pagrindines grupes [4]:

- Trumpam laikui skirtos mažos akumuliacinės talpyklos, naudojamos dažniausiai namų ūkiuose;
- Didelio tūrio šilumos akumuliacinės talpyklos ($1000-50000 \text{ m}^3$) naudojamos ilgam laikotarpiui arba sezonui (sezoninės šilumos akumuliacinės talpyklos);
- Didelio tūrio šilumos akumuliacinės talpyklos integruotam naudojimui su kitomis sistemomis (saulės kolektorių, šilumos siurblių bei kitų įrenginių integravimas į bendrą sistemą).

Šiame magistro baigiamajame projekte nagrinėsime sezoninę didelio tūrio požeminę šilumos akumuliacinę talpyklą kartu su saulės kolektorių sistema integruojant į bendrą sistemą regeneracinę šilumos siurblių. Dažniausi yra keturi pažangiųjų sezoninių šilumos akumuliacinio saugyklų – talpyklų tipai [4]:

- Cisternos tipo požeminė karšto vandens talpykla (TTES);
- PIT tipo požeminė šilumos akumuliacinio saugykla (PTES);
- Gręžinių šilumos saugykla (BTES);
- Vandeningojo sluoksnio požeminė saugykla (ATES).

Cisternos tipo karšto vandens akumuliacinėse talpyklose bei PIT tipo saugyklose paprastai galima akumuliuoti nuo 60 iki 80 kWh/m³, gręžinių šilumos saugyklose – 15 – 30 kWh/m³, o vandeningojo sluoksnio saugyklose – 30 – 40 kWh/m³. Priklausomai nuo sistemos dydžio ir paskirties, karšto vandens akumuliacinių talpyklų tūris gali svyruoti nuo kelių šimtų litrų iki kelių tūkstančių kubinių metrų. Vanduo, kaip akumuliacinio medžiaga, patraukli lyginant su kitomis medžiagomis, skirtomis juntamajai šilumai kaupti, nes turi palyginti didelę savitąją šilumą (apie 4,2 kJ/kg K). Vienas kubinis metras vandens, jei šiluma akumuliuojama 20 – 80 °C temperatūrų intervale, gali sukaupti 70 – 80 kWh šilumos, o tiek šilumos gali pagaminti apie 20 m² plokščiųjų kolektorių saulėtą dieną. Vanduo yra pigus, plačiai paplitęs, naudojamas įvairiose inžinerinėse sistemose ir nenuodingas [4].

Analizuojant šias šilumos energijos akumuliacines talpyklas, buvo sudarytas koncepcijų palyginimas (3.1 lentelė), kuriame įvertinami aktualūs technologiniai parametrai.

3.1 lentelė Šilumos akumuliacinių talpyklų koncepcijų palyginimas

Karšto vandens šilumos akumuliacinė talpykla (TTES)	Karšto vandens-grunto akumuliacinė talpykla (PTES)		Gręžinių šilumos energijos akumuliacinė talpykla (BTES)	Vandeningojo sluoksnio šilumos akumuliacinė saugykla (ATES)
Energnešis				
Vanduo	Vanduo	Gruntas- vanduo	Dirvožemis/ uolienos	Smėlis-vanduo
Šilumos energijos kiekis kWh/m³				
60–80	60–80	30–50	15–30	30–40
Reikalingas akumuliacinis tūris 1m³ vandens ekvivalento				
1 m ³	1 m ³	1,3–2 m ³	3–5 m ³	2–3 m ³

Geologiniai reikalavimai:			
Stabili grunto būseną; Pageidautina, kad nebūtų požeminių vandenių; Reikalingas 5–15m gylis įrengimui.	Stabili grunto būseną; Pageidautina, kad nebūtų požeminių vandenių; Reikalingas 5–15m gylis įrengimui	Pageidautini požeminiai vandenys; Dideli šiluminiai pajėgumai; Aukštas šiluminis laidumas; Žemas hidraulinis laidumas; Reikalingas 30–100 m gylis.	Reikalingas natūralus vandeningas sluoksnis su aukštu hidraulinio laidumu; Turi būti apriboti viršutiniai ir apatiniai žemės sluoksniai; Žemas požeminių vandenių srautas; Vandeningo sluoksnio storis 20–50m

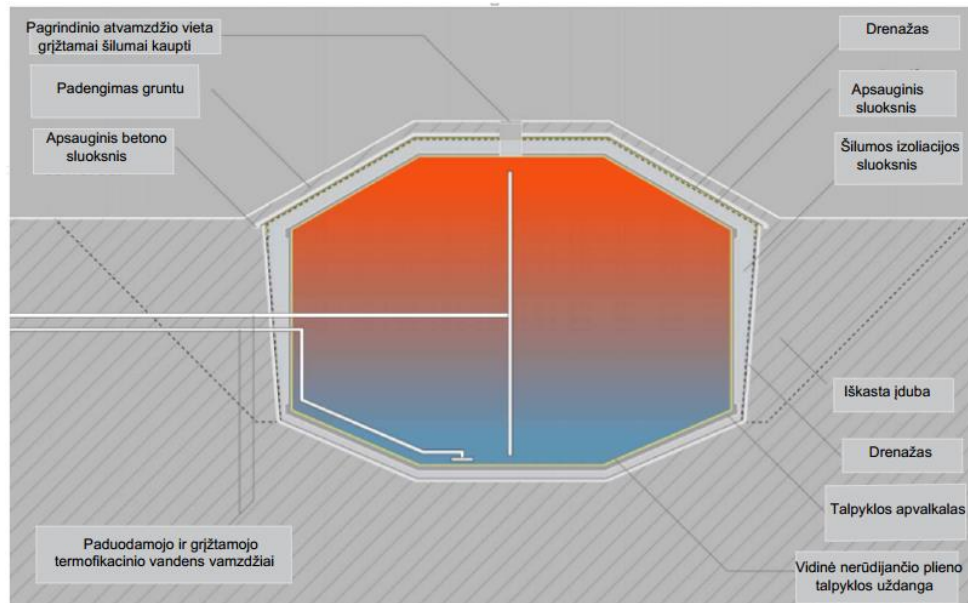
Kaip matome, pagal atliktą koncepcijų palyginimą skirtingoms šilumos akumuliacinėms talpykloms reikalingi skirtingi energnešiai, o taipogi ir skirtingi sukaupti šilumos energijos kiekiai kWh/m³. Didžiausią šilumos energijos kiekį sukaupti gali cisternos tipo šilumos akumuliacinės talpyklos bei PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos (PTES). Kalbant apie geologinius reikalavimus, matome, kad pirmoms dvejoms talpykloms keliami mažiausi reikalavimai bei sąlygos lyginant su kitomis akumuliacinėmis saugyklomis.

3.2 Cisternos tipo karšto vandens šilumos talpyklos (TTES)

Šio tipo šilumos akumuliacinės talpyklos susideda iš dažniausiai po žeme patalpintos cisternos, kuri būna pripildyta vandeniu bei sujungta paduodamaisiais ir grįžtančiais šilumos įkrovimo – iškrovimo termofikacinio vandens vamzdžiais. Cisternos tipo šilumos energijos saugyklos yra paprastai gaminamos iš nerūdijančio plieno ar stiklo pluošto sustiprinto plastiko[5]. Akumuliacinės talpyklos gali būti izoliuotos viršutinėje, šoninėje ir apatinėje dalyje, siekiant sumažinti šilumos nuostolius į aplinką. Šios sezoninės ir didelio tūrio šilumos akumuliacinės talpyklos (1000 – 50000 m³) naudojamos ilgam laikotarpiui arba sezonui, kurios gali sukaupti 60 – 80 kWh/m³ šilumos energijos.

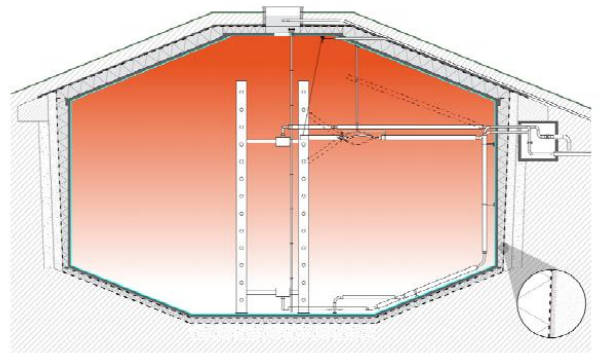
Šilumos akumuliacinės talpyklos yra pagamintos temperatūroms iki 120 °C, kurios yra pripildytos dažniausiai vandeniu, nes vanduo turi puikias šilumos kaupimo savybes bei pajėgumus [6]. Šio tipo energnešį – vandenį yra lengva transportuoti, taip pat lengva ir integruoti į hidraulinės sistemas, nes tai chemiškai nepavojinga ir lengvai valdoma medžiaga.

Šioje talpykloje šilumos energijos kaupimas vyksta per paduodamąjį atvamzdį, kurio dėka pašildytas vanduo yra tiekiamas į saugyklą. Dėl sukauptosios šilumos energijos panaudojimo yra suprojektuoti kiti du atvamzdžiai, kurių dėka vienas iš jų yra grįžtamasis vamzdis, kuriuo teka atvėsus iš šilumos vartotojų termofikacinis vanduo, o kitas atvamzdis – tiekiamasis, yra skirtas paimti šilumą iš viršutinės talpyklos dalies ir ją tikslingai tiekti į šilumos tinklus. Talpykloje esančio šildomo vandens temperatūros stratifikacinis pasiskirstymas vyksta pagal tankių dydį: esant karštesniam vandeniui, jo tankis mažėja, todėl karštesni temperatūriniai sluoksniai pasiskirsto viršutinėje dalyje, o esant šaltesniam vandeniui, jo tankis yra didesnis, todėl jo temperatūriniai sluoksniai atsiduria ties apatine dalimi (3.1 pav.). Kad temperatūriniai sluoksniai tarpusavyje nesimaišytų yra naudojamas papildomas įrenginys, kuris išpurškia pašildytą skirtingų temperatūrų vandenį esant skirtinguose aukščiuose. Tai yra efektyvus metodas išvengti vandens difuzinio maišymosi procesų [6]. Tačiau realybėje idealius stratifikacinius sluoksnius išgauti yra labai sudėtinga, nes įtekantis ir ištekantis vanduo intensyviai ir nuolatos yra maišomas.



3.1 pav. Cisternos tipo karšto vandens šilumos talpyklos (TTES)

Šios talpyklos paprastai statomos po žeme, taipogi labai dažnai gali būti integruotos į esamas kalvas ar mažus kalnelius, kad gyvenvietėse esantys žmonės galėtų šalia vaikščioti bei nedarkytų esamo kraštovaizdžio (3.2 pav.). Geologiškai formuojant saugyklą yra svarbios grunto savybės (labiausiai tinka sustingęs gruntas), taipogi reikia stengtis išvengti požeminių vandenių įtakos 5 – 15 metrų gylyje [6].



3.2 pav. TTES talpyklos integravimas į esamą kalvą, išsaugant kraštovaizdį

3.3 PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos (PTES)

Tai grunto viduje įrengta įdubos tipo šilumos akumuliacinė talpykla. Talpyklos konstrukcija priklauso nuo geometrinių formų bei esamos padėties – reljefo išdėstymo. Paprastai talpyklos sienos būna izoliuojamos, kad šiluma neišeitų į išorę ir išklojamos vandeniui nelaidžia geotekstiline polimembranine danga. Šilumos akumuliacinė talpykla yra pripildyta dažniausiai vandeniu ir šiluma kaupiama viduje užsidengiant viršutiniam izoliaciniam sluoksniui. Talpyklos viršus būna dviejų tipų: plūduriuojantis paviršiuje ir tvirto pagrindo – grunto arba metalo. Akumuliuojant vandenį PIT tipo akumuliacinėse talpyklose sukaupiamas šilumos energijos kiekis būtų tarp 60 – 80kWh/m³ [4].

Antra galimybė yra pripildyti talpyklos tūrį gruntu (žvyru) su jame įsigėrusiu vandeniu ir tokiu būdu kaupti šilumą. Akumuliacinės talpyklos viršus būna taipogi užpildomas gruntu ar kita stipria danga.

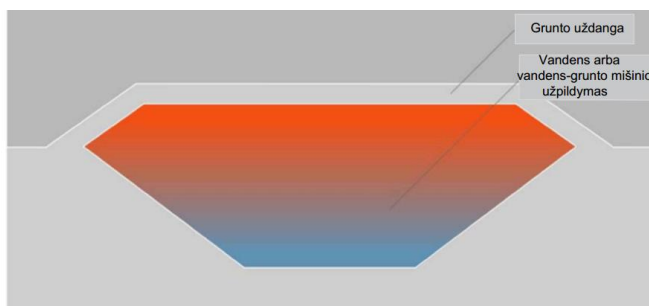
Taigi privalumas šios kaupyklos yra tas, kad galima vienu metu kaupti šilumą naudojant vandenį su gruntu, kurie kartu gali maišytis vienas su kitu. Žvyro frakcijos dalis gali siekti 60 – 70%. Šių talpyklų sukaupiamas šilumos energijos kiekis būtų tarp 30 – 50kWh/m³, o vandens ekvivalentas yra apie 1,3 – 2 m³. Tai reiškia, kad talpyklą pripildant gruntu kartu su vandeniu turėtų būti 1,3 – 2 kartus didesnis tūris, norint išvystyti tą patį pajėgumą lyginant su PIT vandens tipo šilumos akumuliacinėmis talpyklomis [6].

Patogiam geologiniam formavimui šio tipo talpykloms reikalingas tvirtas paviršius, dirvožemio II – III klasė, kaip galima siekiama išvengti požeminių vandenų. PIT šilumos akumuliacinė talpykla turėtų būti įrengiama 5 – 15 metrų gylyje. Įrengtų talpyklų dydžiai paprastai būna nuo 1050 iki 200000 m³[6]. Remiantis įgyvendintais Danijos PIT akumuliacinių talpyklų projektais pateikiame realius pavyzdžius (3.3 pav.).

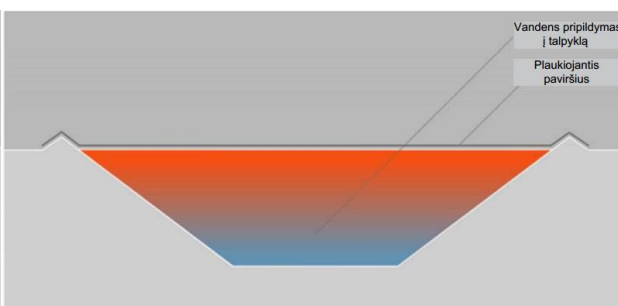


3.3 pav. PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos pavyzdys

Šios akumuliacinės talpyklos skirstomos į du pagrindinius tipus: tai vokiško tipo ir daniško tipo. Vokiškomis vadinamos, kuomet iš šoninių pusių izoliuojama saugykla: sienos, dugnas ir viršutinė dalis. Šio tipo talpyklos būna ir aukštesnės, kadangi viršutinė dalis būna neplaukiojančio tipo, dažnai dengta metalu, sandaria danga bei žinoma stora izoliacija (3.4 pav.). Daniško tipo, tai tokios talpyklos, kuriose sienos ir dugnas nėra papildomai izoliuojamas, vietoj to naudojama geotekstilinė polimembraninė danga 2,5mm storio. Šio tipo saugyklos išskirtinės ir tuo, kad viršutinė dalis būna padengta plaukiojančiu paviršiumi, kuris yra atitinkamai izoliuojamas, tačiau skirtumas nuo vokiško tipo yra tas, kad šios būna viename lygyje su žemės paviršiumi (3.5 pav.). Daniško tipo saugyklos tūriai būna ypač dideli nuo 50000m³ [6].



3.4 pav. Vokiško tipo PIT akumuliacinė talpykla

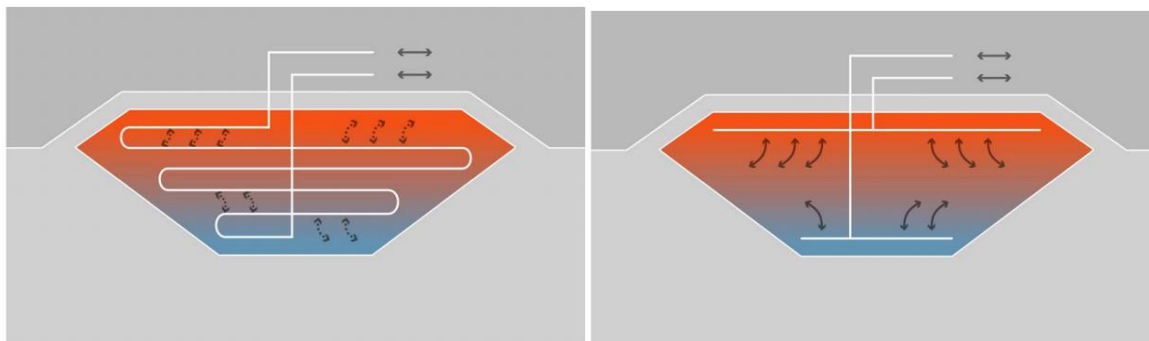


3.5 pav. Daniško tipo PIT akumuliacinė talpykla

Šilumos energijos kaupimas ir atidavimas PIT tipo akumuliacinėse talpyklose

Akumuliuojant šilumą šio tipo talpyklose vyrauja dvejopas energijos kaupimas ir iškrovimas. Vienas iš labiausiai naudojamų yra tiesioginio energijos kaupimo – iškrovimo. Tiesiogiai kaupiant šilumą,

vanduo nuvedamas tiesiai statmenai į saugyklą, o vandenį atiduodant – vyrauja statmenas energijos išgavimas iš aukščiausios talpyklos vietos. Netiesiogiai kaupiant šilumą talpyklos viduje yra įrengiamas papildomas vamzdynas – šilumokaitis. Skirtumas tas, kad vanduo pašildomas ir atiduodamas į termofikacinį tinklą vartotojams neimant tiesiogiai vandens iš saugyklos, o tik gaunant šilumos energiją per vamzdžių sienelės (3.6 pav.) [6].



3.6 pav. Tiesioginis (kairėje) ir netiesioginis (dešinėje) šilumos energijos kaupimas

3.3.1 Šilumos energijos akumuliacinio talpyklų palyginimas esant skirtingoms PIT talpyklų terpėms

Šiluminės energijos saugojimas – akumuliacinis yra aktualus sprendimas gerinant energetikos sistemų veikimą. Šiuo metu aktyviai tiriama šiluminės energijos saugojimo galimybės kogeneracinėse jėgainėse, trigeneracinėse jėgainėse, centralizuotos energijos sistemose, šildymo ir aušinimo sistemose, patalpų šildyme.

Kai energija yra saugoma arba išgaunama šildant arba aušinant terpę be fazinių virsmų medžiagos pokyčių, tai priimta vadinti pažangia šilumos energijos saugykla [7]. Šios šilumos energijos kaupimo sistemos yra paprastos konstrukcijos, bet didelių matmenų, todėl yra sudėtinga kaupti ar tiekti energiją pastovioje temperatūroje, dažniausiai vyksta medžiagų maišymasis. Tipiškos šilumos energijos laikymo terpės gali būti skysčiai, pvz. karštas vanduo, organiniai skysčiai, išlydytos druskos ir skystieji metalai arba kietosios medžiagos: metalai, mineralai ir keramika [7]. Šilumos energijos kaupimo sistemos būna skirtingų terpių – vandeninės ir kietosios terpės, todėl išskiriame jų naudojimo privalumus ir trūkumus.

Vandeninių akumuliacinių talpyklų privalumai:

- Paprastumas;
- Nebrangi, lengvai valdoma, netoksiška, nedegi technologija;
- Aukšta specifinė šiluma ir didelis tankis;
- Šilumokaičiai gali būti vengiami, jei transportavimui naudojama vandens terpė;
- Vienalaikis įkrovimas ir iškrovimas;
- Lankstus reguliavimas ir valdymas.

Vandeninių akumuliacinių talpyklų trūkumai:

- Didelis tūris ir svoris lyginant su latentiniu šilumos saugojimu;
- Darbinė temperatūra yra mažesnė kaip 100 °C;

Akumuliacinių talpyklų naudojančių kietąsias medžiagas kaip šilumnešį privalumai:

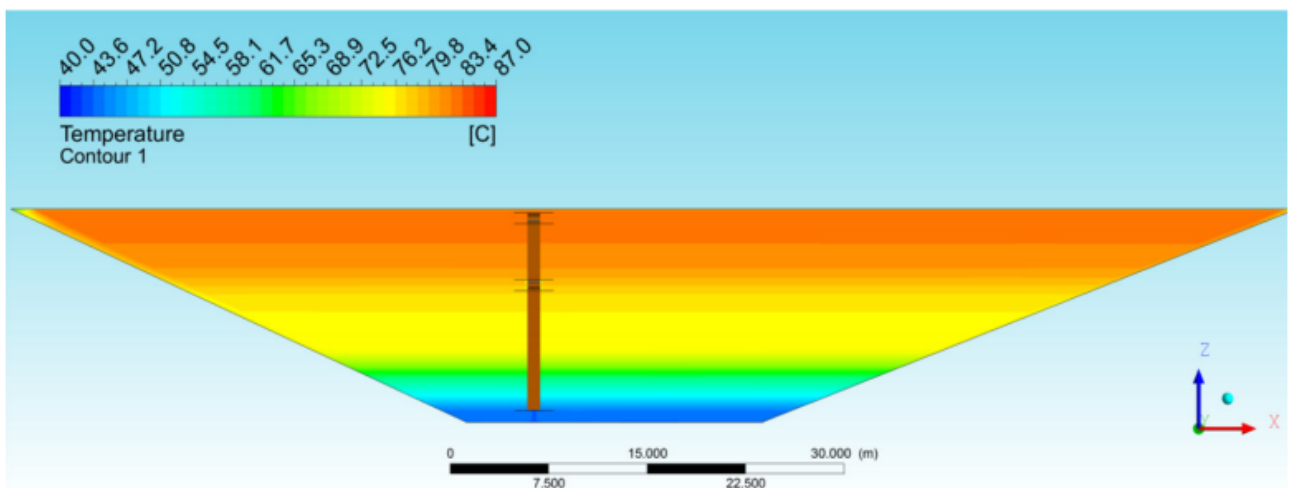
- Kietosios medžiagos gali būti naudojamos net iki 1000 °C temperatūros;
- Didelis šilumos perdavimo plotas;
- Netoksiška ir nedegi technologija.

Akumuliacinių talpyklų naudojančių kietąsias medžiagas kaip šilumnešį trūkumai:

- Išlaidos smarkiai pakyla esant aukštesnei nei 373 K temperatūrai;
- Išlydytų druskų ir skystųjų metalų naudojimas yra ribotas dėl jų tvarkymo, saugojimo ir kitų išlaidų;
- Didesni kietųjų medžiagų kiekiai yra reikalingi nei naudojant vandenį.

3.3.2 Terminė stratifikacija PIT akumuliacinėms talpykloms

Pagrindinis dalykas siejantis šias naujos kartos akumuliacines talpyklas – tai terminė stratifikacija. Esant vandeninėms saugykloms – talpykloms terminė stratifikacija pasireiškia dėl skirtingų vandens tankio sluoksnių. Karštesnis vanduo turi mažesnį tankį, todėl iškyla į viršutinį sluoksnį, šaltesnis vanduo yra tankesnis, todėl atsiduria talpyklos dugne ir susidaro šaltesnis apatinis sluoksnis. Pavaizduotas talpyklos pavyzdys (3.7 pav.) iliustruoja termiškai idealiai stratifikuotą saugyklą. Iš principo, tobulos stratifikacijos arba skirtingo tankio sluoksnių, kurie tarpusavyje visiškai nesimaišo pasiekti yra neįmanoma [7]. Į rezervuarą patekęs vanduo sukels tam tikrą maišymosi procesą. Dėl temperatūros skirtumų atsiranda difuzija ir natūrali konvekcija, kuriai didžiausią įtaką daro šilumos nuostoliai talpyklos paviršiuje, o visa tai sunaikina tobulą sluoksnio susidarymą. Talpyklos turi būti tinkamai izoliuotos, kad būtų išvengta šilumos nuostolių, kurie gali sunaikinti terminius stratifikacinius sluoksnius. Didelio tūrio požeminėse PIT akumuliacinėse talpyklose idealius temperatūrinius sluoksnius pasiekti yra sunku, kadangi vyksta intensyvūs šilumos mainai, vanduo iš apačios yra vėsinamas, o viršuje šildomas.



3.7 pav. Termiškai idealiai stratifikuotos talpyklos pavyzdys

3.3.3 PIT tipo akumuliacinių talpyklų įgyvendinti projektai

PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos yra pastatytos jau daugelyje užsienio valstybių, daugiausia iš jų – Danijoje ir Vokietijoje. Plėtra numatoma didelė, nes yra pastatyta nemažai jėgainių, tačiau ne visuomet yra galimybių panaudoti perteklinę pagamintą šiluminę energiją. Tam labai paranku integruoti akumuliacines sistemas ir tiekti šilumos energiją tuomet, kada ji yra reikalinga miestų vartotojams [7].

Įgyvendinti Danijos projektai:

1) Sunstore 4 Marstal Fjernvarme (3.8 pav)

- Talpyklos tūris: 75 000 m³
- Gylis: 16 metrų
- Viršutinės dalies plotas: 92 x 114m
- Projektas užbaigtas: Rugsėjis 2012
- **Įrengimo kaina 39 Eur/m³**



3.8 pav. Marstal projektas Danijoje

2) Sunstore 3 Dronninglund (3.9 pav.)

- Talpyklos tūris: 69 000 m³
- Gylis: 16 metrų
- Viršutinės dalies plotas: 91 x 91 m
- Projektas užbaigtas: Rugsėjis 2013
- Izoliacijos storis: 240mm
- **Įrengimo kaina 25 Eur/m³**



3.9 pav. Dronninglund projektas Danijoje

3) Vojens Fjernvarme (3.10 pav)

- Talpyklos tūris: 205 000 m³
- Gylis: 16 metrų
- Viršutinės dalies plotas: 91 x 91 m
- Projektas užbaigtas: 2015m. vasara
- **Įrengimo kaina 21 Eur/m³**



3.10 Pav. Vojens projektas Danijoje

4) Gram Fjernvarme (3.11 pav)

- Talpyklos tūris: 122 000 m³
- Gylis: 16 metrų
- Viršutinės dalies plotas: 91 x 91 m
- Projektas užbaigtas: 2015m. vasara
- **Įrengimo kaina 21 Eur/m³**

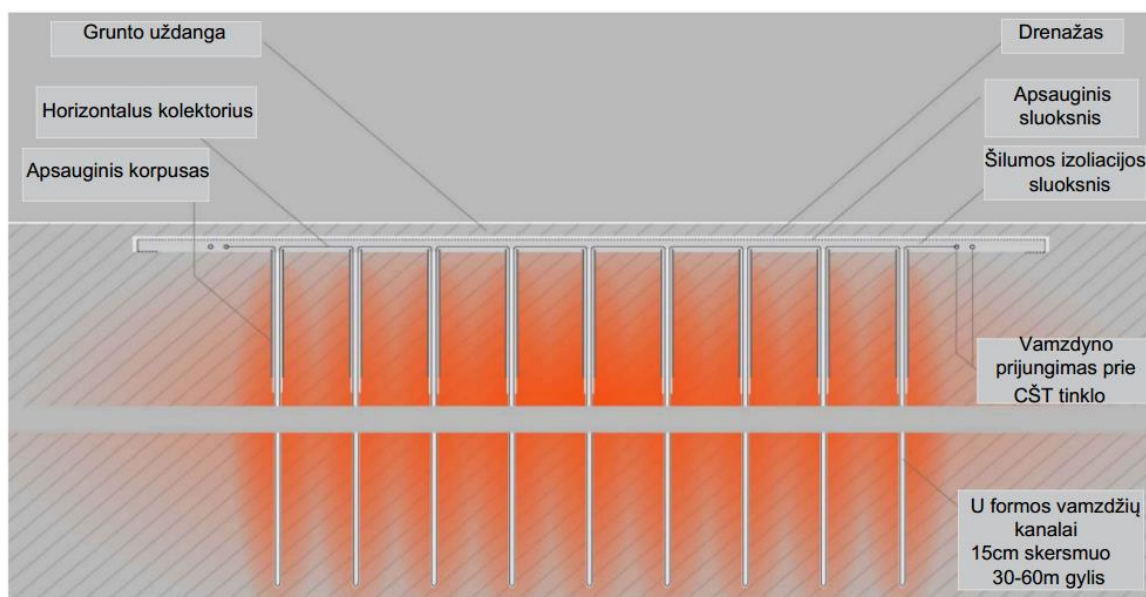


3.11 Pav. Gram projektas Danijoje

3.4 Gręžinių šilumos energijos akumuliacinė talpykla (BTES)

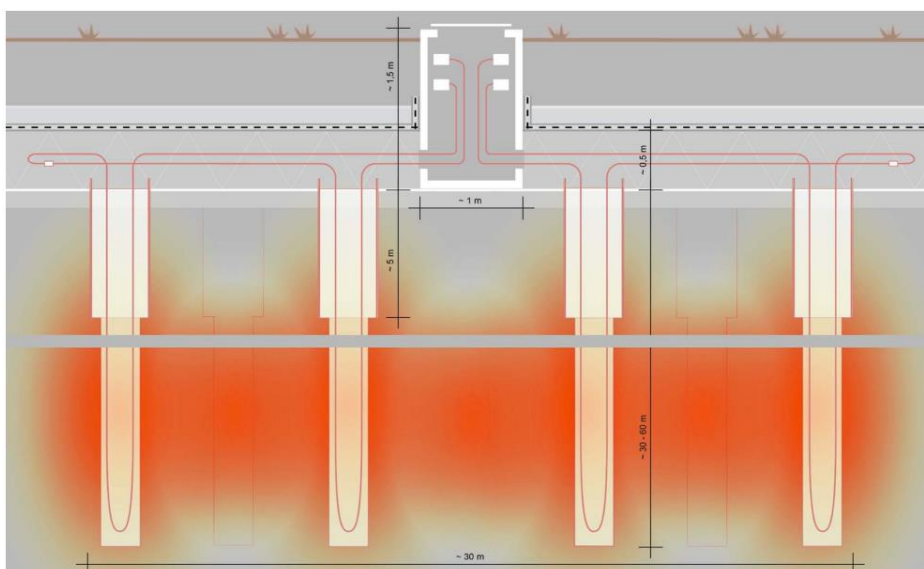
Šio tipo šilumos saugyklose energija akumuliuojama tiesiogiai po žeme. Paprastai yra naudojami U formos vamzdžių kanalai, kurie yra tiesiogiai įdedami į vertikaliai iškastus iki 100m gylio gręžinius. Tinkamui geologiniui formavimui reikalingas gruntas be natūralių požeminių vandenu pritekėjimų. Jeigu grunto paviršiuje yra požeminių vandenu, gręžiniai papildomai gali būti sutvirtinami specialiais apsauginiais korpusais. U formos vamzdžių kanalai arba geoterminiai zondai yra montuojami į vertikaliai iškastus gręžinius, dėl kurių išgaunamas didelio pajėgumo šilumokaitis, kurio pagalba vyksta šilumos mainai pašildant vandenį, kitu darbinium agentu. Paprastai naudojamas vandens – gliukolio mišinys, kuris cirkuliuoja gręžinių geoterminiuose zonuose. Kalbant apie šios akumuliacinės talpyklos technologinę sudėtį, yra išskiriamos šios pagrindinės dalys: viršutinė šilumos izoliacija esanti ties žemės paviršiumi, tai pat horizontalus geoterminis kolektorius, įrengiamas nuo 1m iki 1,5m gylyje, kurio pagalba vyksta šilumos energijos mainai darbo agentui atiduodant šilumą vandeniui. Taip pat svarbios technologinės dalys yra apsauginiai vamzdynų korpusai, kurie paprastai būna izoliuojami, dėl ekonominių veiksmų dažniausiai daromi viršutiniuose grunto sluoksniuose (3.12 pav.) [6].

Priklausomai nuo talpyklų dydžio, šilumnešis gali būti pašildomas iki 80 °C. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos grunto pagalba gali kaupti 15 – 30 kWh/m³. Talpyklos turėtų būti 20000 m³ minimalaus tūrio, kad būtų energetiškai ir ekonomiškai patrauklios investicijos. Taipogi reiktų paminėti, kad dėl dažnai sukauptos ir atiduodamos šiluminės energijos, šios gręžinių talpyklos geriausiai dirbtų jas integruojant į bendrą energetinę sistemą [6].



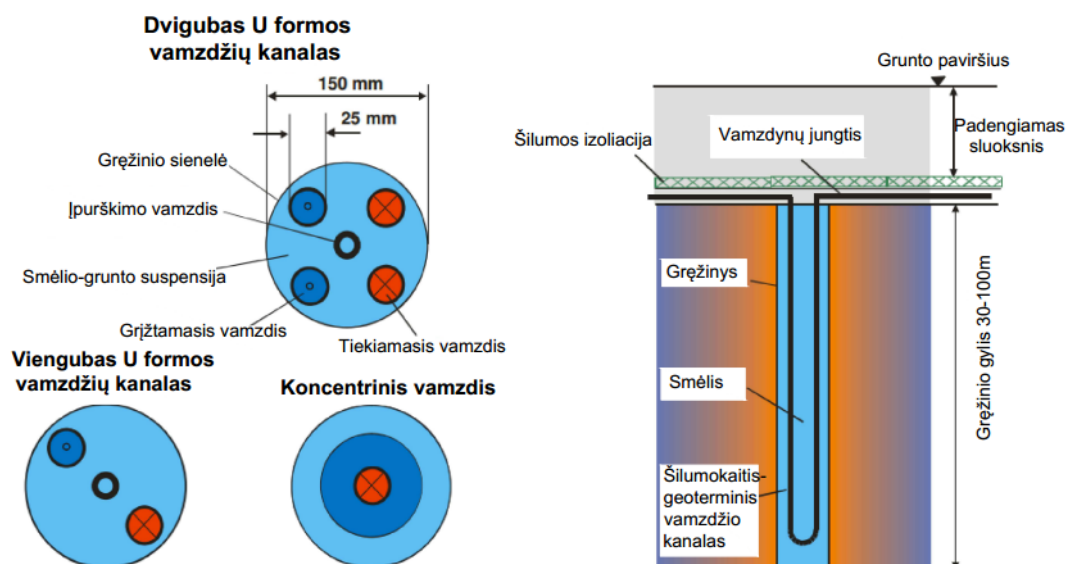
3.12 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos sandara

Gręžinių diametras geoterminiams zondams paprastai būna 0,1 – 0,2m, o horizontalus tarpas tarp kiekvieno iškasto gręžinio privalo būti 1,5 – 3m atstumu [6]. Pateikiame konkretų pavyzdinį BTES tipo akumuliacinės talpyklos skerspjūvio pavyzdį (3.13 pav):



3.13 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos skerspjūvis

Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos gali būti sudarytos iš viengubo U formos vamzdžių kanalo, dažnesniu atveju iš dvigubų U formos vamzdžių kanalų arba koncentrinėjų vamzdžių, kurie daugiausia pagaminti iš sintetinių medžiagų. BTES talpyklos neturi vertikalios, tačiau turi horizontalią temperatūrinę stratifikaciją, matuojant nuo centro iki gręžinių sienų. Taip yra todėl, kad šilumos perdavimas priklauso nuo šilumos laidumo, o ne nuo konvekcijos [6]. Vamzdžio centre yra didžiausia temperatūra, o pasienyje yra temperatūros sumažėjimas dėl aplinkos nuostolių. Viršutiniame saugojimo paviršiuje izoliacinis sluoksnis sumažina aplinkos nuostolius. Šoninės sienos ir dugnas paprastai nėra izoliuotos dėl neprieinamumo, todėl šilumos nuostoliai neišvengiami (3.14 pav.).



3.14 pav. Gręžinių šilumos energijos akumuliacinės talpyklos vertikalus skerspjūvis ir sandara

Lyginant su ATES akumuliacinėmis sistemomis, BTES sistemas lengviau realizuojamos ir naudojamos. Gręžinių šilumos akumuliacinės talpyklos turi mažiau priežiūros ir turi didelį patvarumą. Dėl uždaro ciklo sistemos BTES sistemos paprastai reikalauja paprastų įgaliųjų

patvirtinimo procedūrų, nebent numatoma didelė laikymo temperatūra (apie 50 °C) [4]. 3.2 lentelėje pateikiame tipines bendrosios BTES sistemų vertes ir parametrus:

3.2 lentelė Pagrindiniai parametrai BTES tipo akumuliacinėms talpykloms

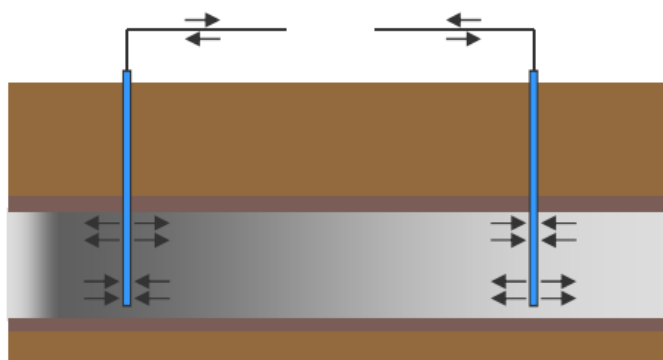
Pagrindiniai parametrai BTES tipo akumuliacinėms talpykloms			
BTES gręžinio skersmuo	100–150 mm	Vandens srauto greitis U formos kanaluose	0,5–1,0 m/s
BTES gręžinio gylis	30–100m	BTES vidutinė galia metrui atstumo	20–30 W/m
Atstumas tarp gręžinių	2–4m	Minimali/maksimali įtekėjimo temperatūra	nuo -5 iki +90 °C
Grunto šilumos laidumas	2–4 W/(m·K)	Vidutinė kaina BTES talpyklų metrui atstumo	50–80 €/m

3.5 Vandeningojo sluoksnio šilumos akumuliacinė saugykla (ATES)

Vandeningojo sluoksnio saugyklos veikia natūraliai vykstančių požeminių vandenų pagalba, kurie naudojami šilumos kaupimui – akumuliacijai. Šilumos akumuliacija vyksta įrengus minimaliai bent du gręžinius, kurių pagalba vyksta šilumos įkrovimo bei išgavimo technologiniai procesai (3.15 pav.). Visas veikimo principas yra paremtas tuo, kad per šilumos įkrovimo – kaupimo periodus šaltas požeminis vanduo išgaunamas pro pasirinktą dirbtinį įrengtą gręžinį, sušildomas šilumos šaltinio ir tuomet atiduodamas į šiltesniąją terpę – kitą įrengtą gręžinį, tokiu būdu kaupiant šilumą. Požeminis vanduo dažniausiai sušildomas panaudojant saulės energiją, integruojant į bendrą energetinę sistemą saulės kolektorius. Iškraunant arba atiduodant sukauptą šilumą tekėjimo kryptis tampa priešinga: šiltas vanduo išgaunamas iš šiltesniojo gręžinio ir šilumokaičio pagalba atiduodamas pašildytas termofikacinis vanduo šilumos vartotojui [4].

Tinkama geologinė padėtis yra tokia: reikalingas natūralus vandeningas sluoksnis su aukštu hidrauliniu laidumu, turi būti apriboti viršutiniai ir apatiniai žemės sluoksniai, žemas požeminių vandenų srautas, o vandeningo sluoksnio storis turėtų būti apie 20 – 50m.

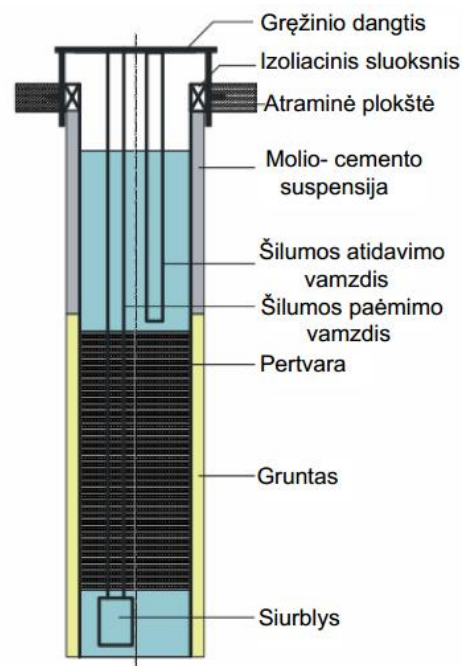
Šio tipo šilumos akumuliacines sistemas nėra taip paprasta realizuoti, reikalinga žymiai daugiau priežiūros, investicijų. Tačiau jei geologinė padėtis yra tinkama, atsipirkimas paprastai būna trumpas [4].



3.15 pav. Vandeningojo sluoksnio šilumos akumuliacinė talpykla

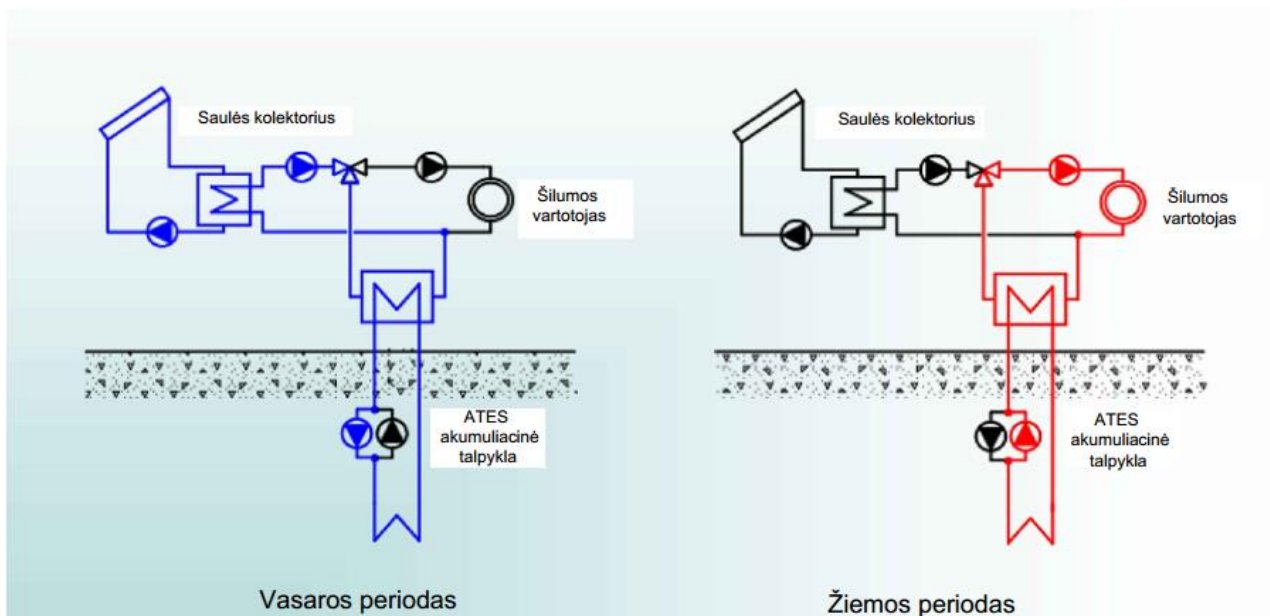
Ypatybės ir sąlygos, į kurias projektuojant šio tipo talpyklas reikia atsižvelgti, yra [4]:

- Stratigrafija (sluoksnių sekos);
- Pirminio poringumo vandeningųjų sluoksnių pasiskirstymas;
- Struktūros ir lūžių pasiskirstymas;
- Vandens telkinio gylis ir geometrija, hidraulinės ribas įskaitant;
- Kaupimo - akumuliacinio koeficientas;
- Nuotėkio koeficientas (vertikali hidraulinė įtaka);
- Konsolidavimo laipsnis (kietumas);
- Terminis gradientas (temperatūros padidėjimas gylyje);
- Natūralaus grunto vandens srautas ir srauto kryptis;
- Vandens chemija.



3.16 pav. Vandeningo sluoksnio šilumos akumuliacinės talpyklos vertikalus skerspjūvis

Kalbant apie šių akumuliacinių talpyklų dydį, jis paprastai priklauso nuo pačio vandeningo sluoksnio kiekio bei galimybių sukaupti jame energiją. Iš įgyvendintų pavyzdžių galima būtų akcentuoti Vokietijoje Rostoke įrengtą ATES akumuliacinę sistemą, kuri yra 20000 m³ tūrio (3.17 pav.). Ši akumuliacinė sistema buvo išvystyta kaupiant saulės šilumos energiją panaudojant saulės kolektorius.



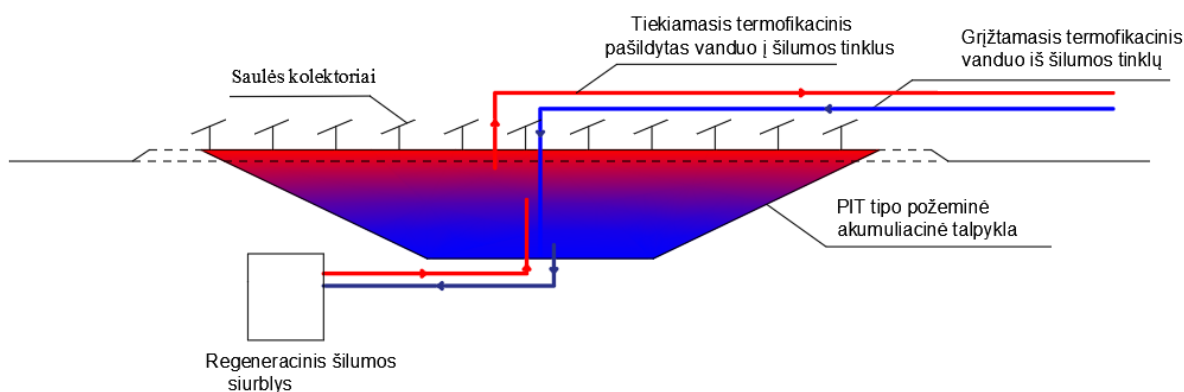
3.17 pav. Rostoko ATES akumuliacinės sistemos techninė koncepcija

3.6 Saulės šilumos energijos kaupimas ir integracija su didelio tūrio PIT akumuliacine talpykla

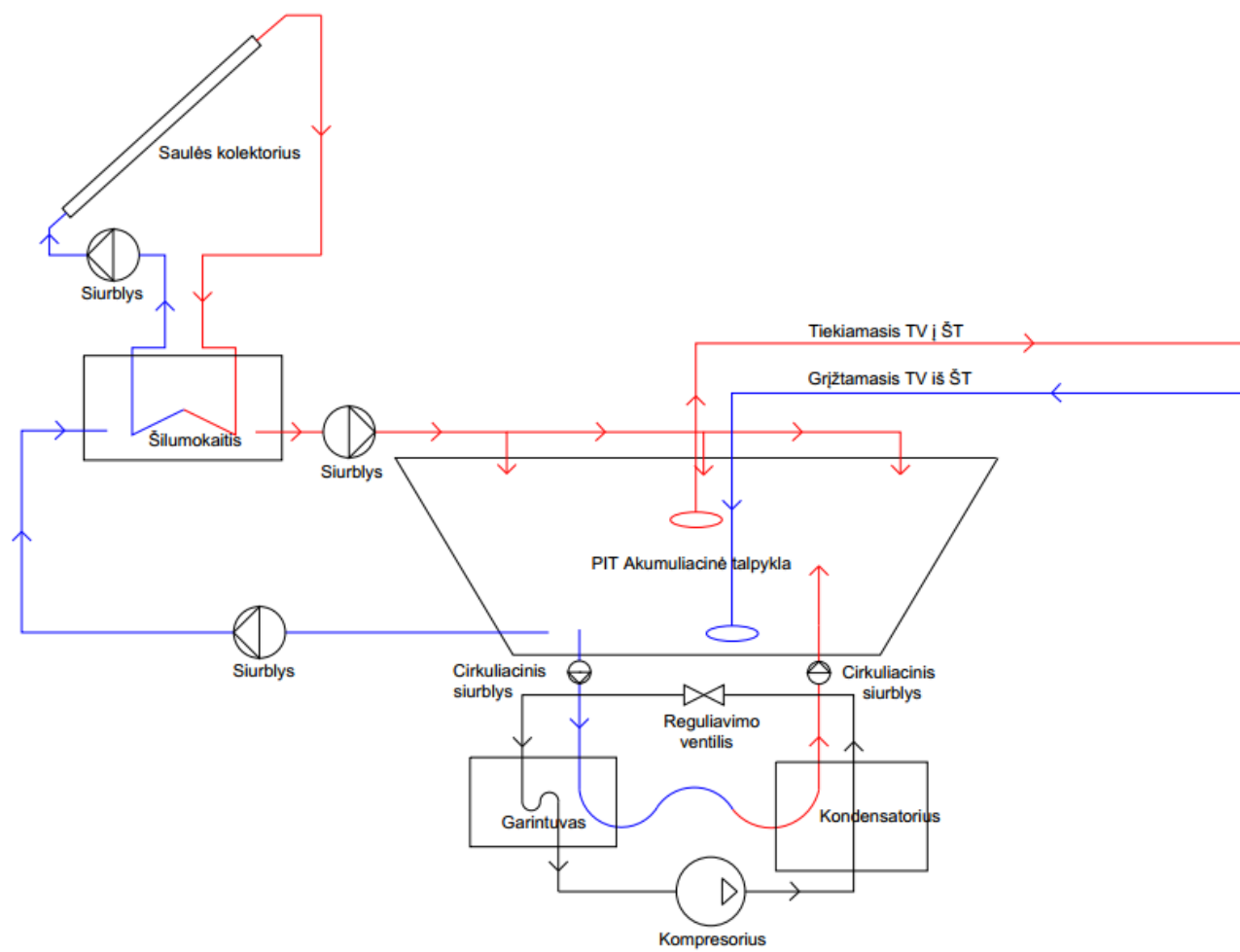
Šiame magistro baigiamajame projekte nagrinėjame didelio tūrio šilumos akumuliacinę talpyklą kartu su saulės kolektorių sistema, integruojant į bendrą sistemą regeneracinį šilumos siurblį. Bendra energetinė sistema veikia tokiu principu: nuo kovo iki lapkričio mėnesio pabaigos iš saulės energijos plokščiųjų kolektorių pagalba sugeriami šiluma ir kaupiama požeminėje sezoninėje akumuliacinėje talpykloje. PIT tipo saugykloje šildomas vanduo tampa skirtingų temperatūrų, dėl kurių susiformuoja skirtingi temperatūriniai – stratifikaciniai sluoksniai, kuriuos nuolatos ardo difuziniai vandens srautai. Paprastai, šildomas vanduo siurblių pagalba, paaimamas iš apatinio talpyklos sluoksnio ir perkeliamas į šilumokaičius, kurie šilumą perduoda saulės kolektorių darbo agentams. Iš saulės kolektorių pašildytas darbinis agentas perduoda šilumą šilumokaičiuose esančiam vandeniui, kuris išpurškiamas akumuliacinės talpyklos viršutiniame sluoksnyje. Tokiu būdu saugyklos viršuje susiformuoja karšto vandens sluoksnis, kuris gali būti panaudojamas karšto termofikacinio vandens tiekimui į miestų šilumos tinklus. Dėl to saugyklos viduje paprastai įrengiami du atvamzdžiai, kur pirmasis, iš viršutinio sluoksnio, skirtas tiekti pašildytą vandenį į šilumos tinklus, o antrasis atvamzdis – skirtas grįžtančiojo atvėsusio, iš žema – temperatūrinių šilumos tinklų, termofikacinio vandens išleidimui į talpyklos apatinę zoną (3.19 pav.).

Esant gruodžio – vasario mėnesiais, šilumą generuojame papildomai integruojant pramoninį regeneracinį šilumos siurblį. Šilumos siurblys veiktų šilumą imdamas iš talpyklos apatinio vandens sluoksnio ir gražindamas taip pat į apatinę dalį. Šis įrenginys veiktų dalinai regeneruojant paaimamą šilumą nuo rezervuaro dugno ir gražindamas pašildytą vandenį. Tokiu būdu būtų pašildomas PIT akumuliacinėje talpykloje esantis šilumnešis - vanduo. Pašildytas vanduo siurbliais būtų tiekiamas į žeme-temperatūrinį tinklą Akademijos miestelio šilumos vartotojams (3.18 pav.).

Atsižvelgiant į nedidelio miestelio vartotojų šilumos poreikius (12000 MWh) ir įvertinus, kad akumuliuojant vandenį PIT tipo akumuliacinėse talpyklose sukauptas šilumos energijos kiekis būtų apie 70 kWh/m³, optimalus požeminės talpyklos tūris būtų 170000 m³.



3.18 pav. Akumuliacinės sistemos integracija su saulės kolektoriais ir regeneraciniu šilumos siurbliu



3.19 pav. Technologinė schema

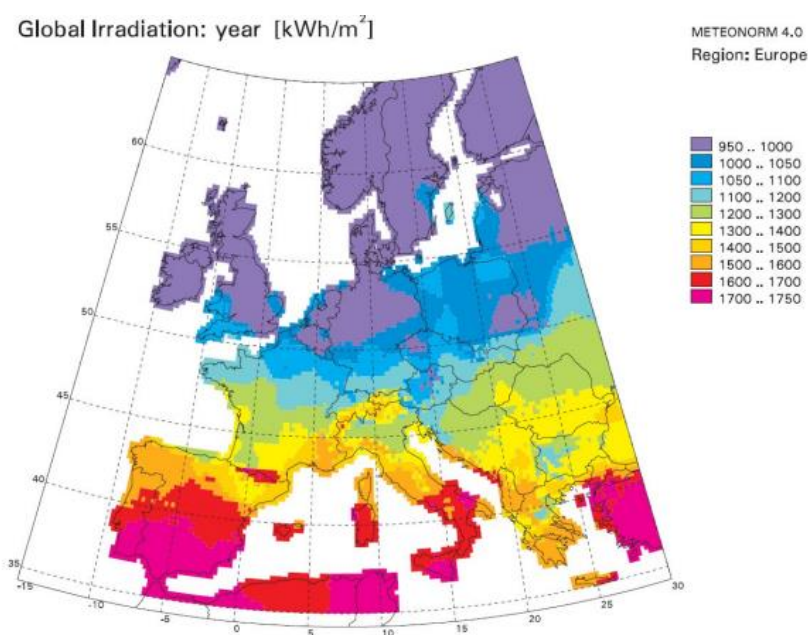
4. Saulės energijos potencialo panaudojimo galimybės

4.1 Saulės spinduliuotės prieinamumas

Norint įvertinti galimybes panaudoti saulės energijos šilumą projektuojant saulės kolektorių jėgainę su akumuliacine PIT tipo talpykla reikia išsiaiškinti saulės energijos išteklių kiekius – saulės ekspoziciją kWh/m². Palyginimui pateikiamos Lietuvos ir kai kurių Europos šalių, kurios remia ir plėtoja saulės energetiką, daugiametės vidutinės pilnutinės saulės ekspozicijos horizontalioje plokštumoje [8]:

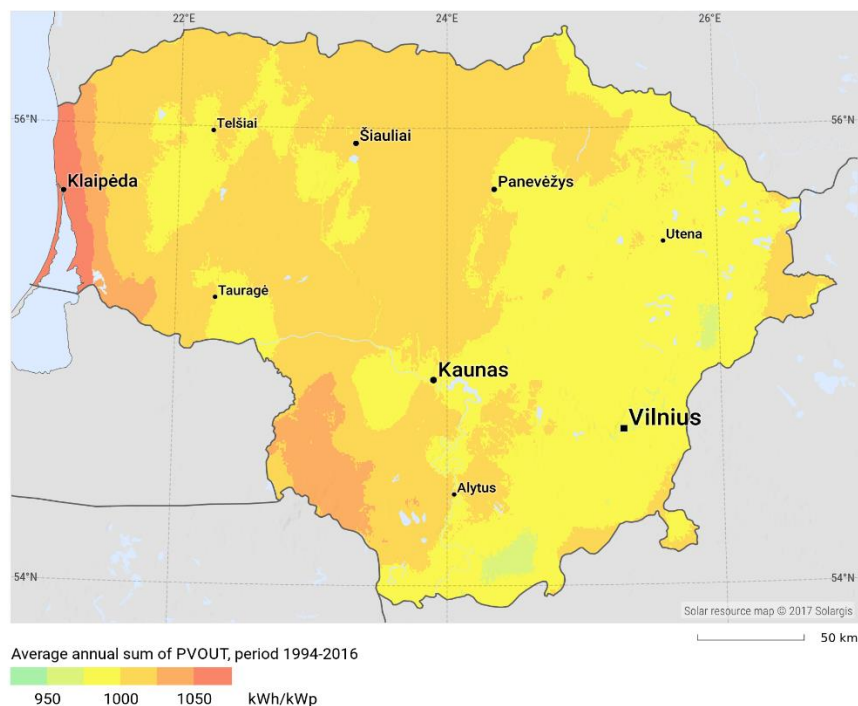
- Vokietijoje – 967 – 1212 (šalies pietinėje dalyje) kWh/m²
- Austrijoje (Viena) – 1106 kWh/m²
- Didžiojoje Britanijoje – 700 kWh/m²
- Lietuvoje – 926 – 1042 kWh/m²

Panaudojus programine įranga „Meteonorm“ pastebime, kad Baltijos šalyse metinė saulės apšvieta ant horizontalaus paviršiaus siekia 1000 – 1050 kWh/m². Galime padaryti prielaidą, kad Lietuvoje ir kitose Baltijos šalyse bus vis labiau skatinamos bei plėtojamos atsinaujinančios saulės energijos technologijos gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų, pramoninių objektų šildymui ir elektros energijos gamybai, kadangi Vokietijos metinė saulės ekspozicija yra labai panaši kaip ir Lietuvos (4.1 pav.) [9].



4.1 pav. Vidutinė metinė saulės apšvieta (kWh/m²) Europos valstybėse ant horizontalaus paviršiaus

Žemiau pavaizduotame paveikslėlyje (4.2 pav.) naudojantis „PVgis“ programa parodome Lietuvos vidutinį saulės spinduliuotės poveikį ant horizontalaus paviršiaus. Pastebime, kad vidutiniškai Kauno rajone saulės spinduliuotė siekia 1000 kWh/m². Jei saulės kolektoriai būtų pakreipti 37 °C kampu ir pasukti į pietų pusę, saulės spinduliuotė sukaupiama būtų dar efektyviau ir siektų vidutiniškai 1150 kWh/m² [9].

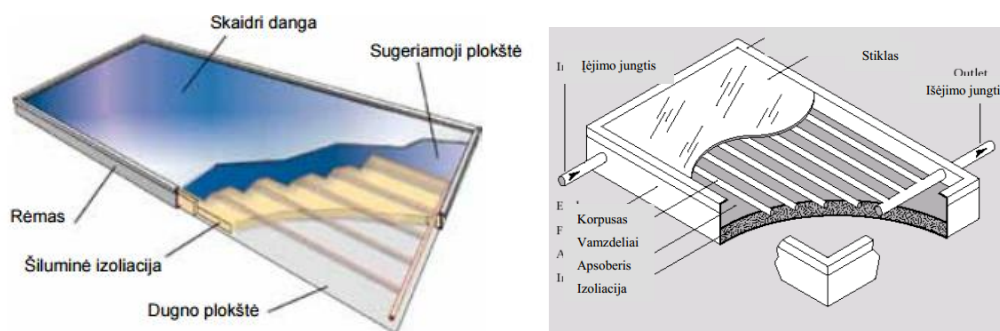


4.2 pav. Vidutinė metinė saulės apšvieta (kWh/m^2) Lietuvoje ant horizontalaus paviršiaus

4.2 Šilumos energijos kaupimas iš plokščiųjų saulės kolektorių ir veikimo principas

Saulė yra neišsemiamas energijos šaltinis. Dažniausiai naudojamos kolektorių rūšys yra vakuuminiai ir plokštieji saulės kolektoriai. Jie yra patys populiariausi šiaurinėse Baltijos šalyse. Taipogi būna ir koncentruojantys saulės kolektoriai (paraboliniai), tačiau kadangi didžioji metinė apšvitos dalis yra išsklaidyta – ypač šiaurinėje Europos dalyje – šių saulės kolektorių tipai nėra plačiai naudojami.

Plokščiasis saulės kolektorius sudarytas iš absorberio (šilumą sugerianti plokštelė), šilumos izoliacijos, skaidrios apsauginės dangos (stiklas arba plastikas), vamzdelių (vamzdeliai skysčiui), kuriais teka šilumnešis, įtekėjimo ir ištekėjimo jungčių, korpuso (4.3 pav.). Absorberis yra svarbiausia saulės kolektoriaus dalis. Saulės spinduliai per skaidriąją dangą patenka ant juodos absorberio plokštės ir ją įšildo. Šilumą nuo absorberio nuneša šilumnešis. Vandens šildymo saulės kolektorių absorberių plokštėse būna suformuoti kanalai skystam šilumnešiui tekėti [10].

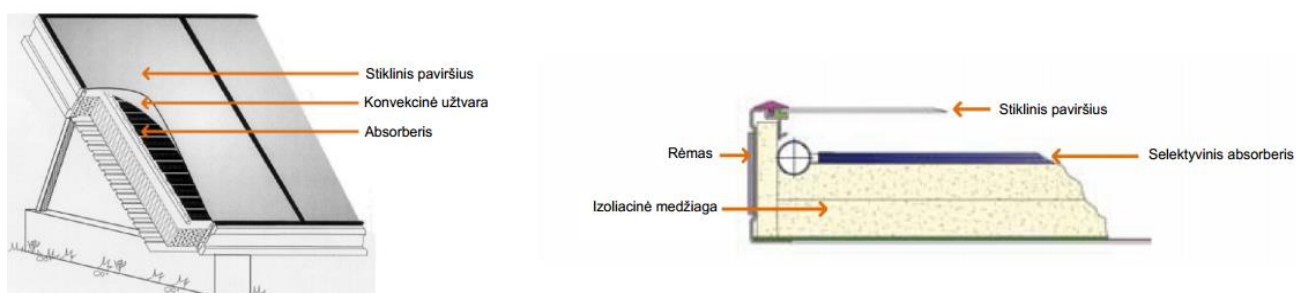


4.3 pav. Plokščiojo saulės kolektoriaus sandara

Absorberio medžiaga turi būti laidži šilumai, atspari korozijai ir temperatūrai. Viena iš geriausių absorberio medžiagų yra varis. Absorberio paviršius dažomas matine spalva arba aptraukiamas specialia selektyvia danga. Dangai dažniausiai naudojamas labai skaidrus grūdintas stiklas.

Absorberio dugnas ir šonai izoliuojami šilumine izoliacija. Saulės kolektoriaus korpusas gaminamas iš aliuminio, plieno, plastmasių ar impregnuotos medienos. Dėl specialios šilumą perduodančios technologijos varinis vamzdelis yra apgaubtas 360° šilumą nuvedančiomis plokštėmis. Kontaktas tarp metalinės plokštelės ir cirkuliacinių vamzdžių itin svarbus, nes nuo jo priklauso šilumos perdavimo efektyvumas.

Plokšteliniai saulės kolektoriai gaminami dviejų tipų: su konvekciniu oro tarpu arba be tarpo tarp absorberio ir dangčio stiklo (4.4 pav.). Dažnai konvekcinis barjeras susideda iš plonos plastikinės plėvelės arba papildomo stiklo sluoksnio. Šis atstumas tarp absorberio ir dangčio stiklo yra svarbus siekiant sumažinti šilumos konvekcijos ir laidumo nuostolius, svarbu gauti optimalų atstumą tarp absorberio ir konvekcijos kolektoriaus stiklo [10].



4.4 pav. Plokštelinis saulės kolektorius su konvekciniu barjeru ir be jo

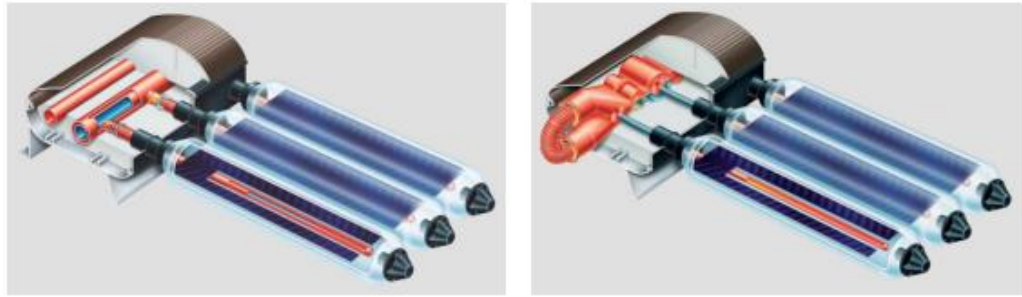
4.3 Šilumos energijos kaupimas iš vakuuminių saulės kolektorių ir veikimo principas

Vakuuminio kolektoriaus pagrindinis elementas – šilumą absorbuojantis vidinis kolbos paviršius. Kolbos sudarytos iš dvigubo stiklinio vamzdžio, kurios išorinis stiklas skaidrus, o vidinis padengtas energiją gerai absorbuojančia medžiaga – matine juoda šiurkščia danga. Šilumą priima šilumos nešėjas, kuriuo gali būti tiek paprastas vanduo, tiek ir kiti skysčiai. Jis išilęs kyla vamzdžiu į viršų ir patenka į kolektorių – didesnio skersmens vamzdį, kuris padengtas šilumą izoliuojančiu sluoksniu [10].

Energijos perdavimas vyksta keturiais etapais:

- 1) Skystis esantis vakuuminiuose saulės kolektoriuose yra išgarinamas saulės energijos.
- 2) Susidarę garai kyla vamzdeliu į viršutinę dalį, kur susitinka su šaltesniuoju vamzdžiu ir jame esančiu fluidu.
- 3) Garai atiduoda savo sukauptą šilumą viršutiniame vamzdyje esančiam fluidui, todėl vyksta kondensacijos procesas.
- 4) Susikondensavęs garas grįžta atgal į kolektoriaus apačią, kur procesas vyksta vėl nuo pradžių.

Taipogi vakuuminiai saulės kolektoriai būna dviejų tipų, atskirų šildymo vamzdelių ir tiesioginio tekėjimo (4.5 pav.) [10].



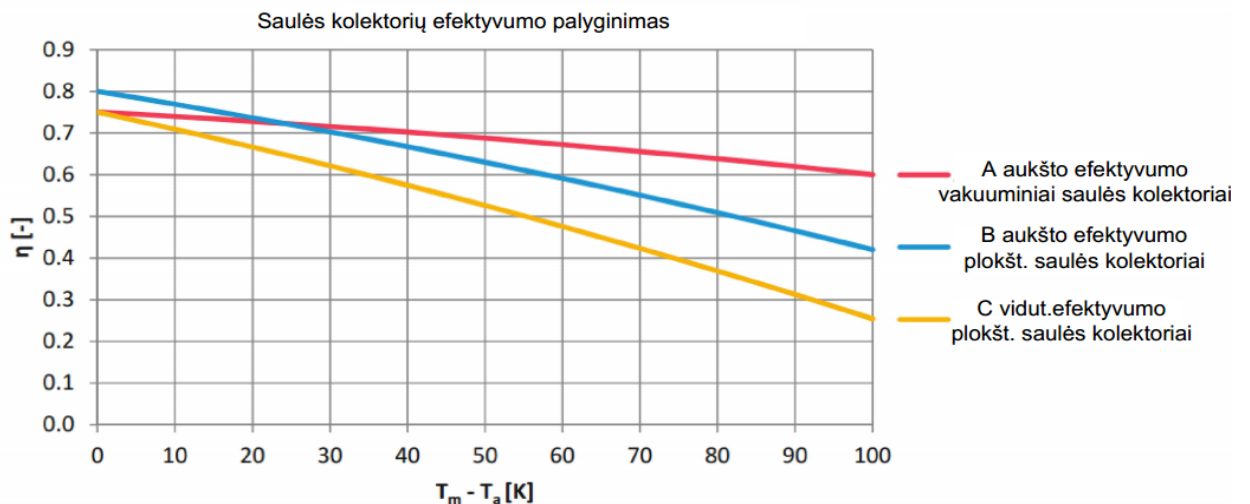
4.5 pav. Vakuuminiai saulės kolektoriai atskiro ir tiesioginio veikimo

4.4 Vakuuminių ir plokštelių saulės kolektorių palyginimas

Ilustruojant, vakuuminių ir plokščių saulės kolektorių efektyvumo ir kolektorių temperatūros priklausomybes, pastebime, kad didėjant skirtumui tarp (T_m) vidutinės temperatūros tarp įeinančio fluideo ir išeinančio bei aplinkos temperatūros (T_a), mažėja kolektorių efektyvumas. Matome, kad vakuuminiai teoriškai yra šiek tiek efektyvesni už plokščiuosius kolektorius, tačiau nepaisant šių skirtumų, rinkoje paklausesni ir investiciniu požiūriu patrauklesni yra plokštieji saulės kolektoriai. Pateikiame keletą pavyzdinių duomenų 4.1 lentelėje bei atitinkamus efektyvumo palyginimus tarp plokščių ir vakuuminių saulės kolektorių (4.6 pav) [10].

4.1 lentelė. Vakuuminių ir plokštelių saulės kolektorių palyginimas

Saulės kolektorių tipas	η_0	$a_1(W/(K \cdot m^2))$	$a_2(W/(K \cdot m^2))$
Aukšto efektyvumo vakuuminis saulės kolektorius	0,75	1,0	0,005
Aukšto efektyvumo plokštelinis saulės kolektorius	0,8	3,0	0,008
Vidutinio efektyvumo plokštelinis saulės kolektorius	0,75	4,0	0,01



4.6 pav. Saulės kolektorių efektyvumo palyginimas

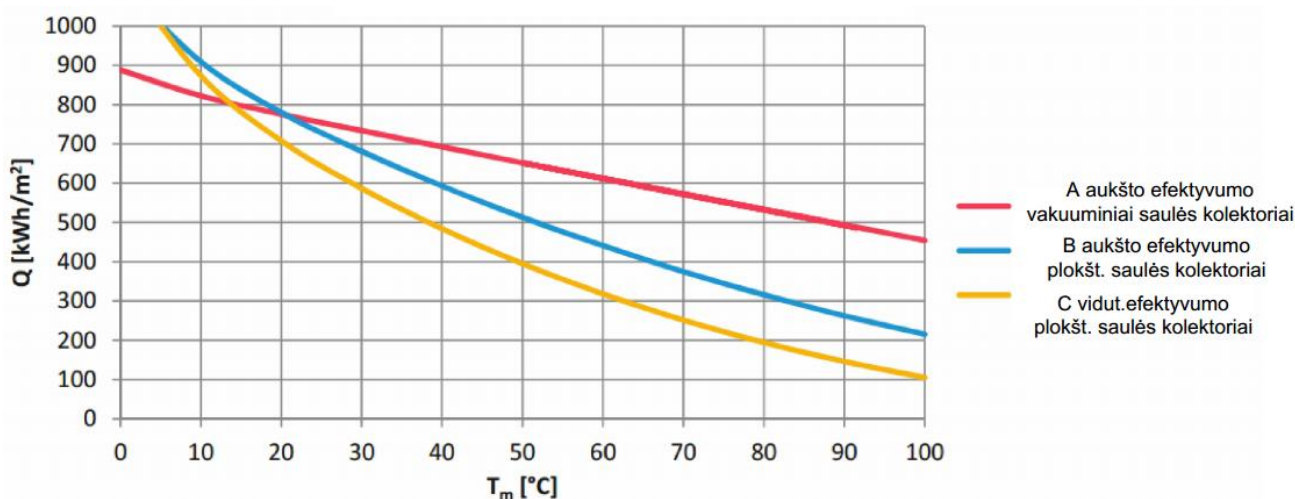
Analizuoti buvo trys atvejai, kuomet naudojamas aukšto ir vidutinio pajėgumo plokštelinis saulės kolektorius bei vakuuminis saulės kolektorius. Matome, kad skirtingo tipo saulės kolektoriuose aukštėjant fluideo temperatūrai, mažėja saulės kolektorių efektyvumas.

Metiniai energijos gamybos saulės kolektorių pajėgumai

Metinio saulės energijos pajėgumo Q (kWh/m^2) priklausomybė nuo vidutinės temperatūros (T_m) vakuuminiam ir dviems plokštiniams kolektoriams kaip pastebime skiriasi (4.7 pav.). Esant vakuuminiam kolektoriui šilumos pajėgumas yra išgaunamas didesnis esant aukštesnėms temperatūroms, tačiau trūkumas pagrindinis yra kaina. Nors iš plokščiųjų saulės kolektorių, kaip matome, esant aukštesnėms temperatūroms išgaunamas mažesnis šilumos kiekis, tačiau daugumose esamų įrengtų saulės jėgainių su akumuliacinėmis talpyklomis naudojami yra plokštiniai saulės kolektoriai [10].

Kalbant skaičiais – vakuuminis kolektorius iki 30% efektyvesnis skaičiuojant visų metų naudojimą, tačiau ir kaina vakuuminio kolektoriaus gali būti dvigubai didesnė. Plokščiasis kolektorius yra patvaresnis ir ilgaamžiškesnis.

Šiuo metu šilumos gamyboje iš saulės energijos dažniausiai naudojami plokštieji saulės kolektoriai. Vakarų ir vidurio Europoje iš visų naudojamų saulės kolektorių net 90% yra plokštieji saulės kolektoriai. Jie pasižymi puikiu kainos, kokybės ir efektyvumo santykiu, nereikalauja priežiūros ir yra ilgaamžiai. Vakuuminiai saulės kolektoriai yra naudojami, kuomet reikalinga aukšta šilumnešio temperatūra arba yra kitų specifinių reikalavimų.



4.7 pav. Metinio saulės energijos pajėgumo Q (kWh/m^2) priklausomybė nuo vidutinės temperatūros (T_m)

4.5 Saulės kolektorių projektavimas ir energetinė analizė

Kaip taisyklė, saulės kolektoriai centralizuotai energijos gamybai gali būti išdėstomi įvairiais būdais – įrengti ant žemės paviršiaus, arba ant pastato – jėgainės stogų. Šiuo atveju projektuojame ant akumuliacinės vandens talpyklos viršaus – stogo.

Antžeminis saulės kolektorių laukas kartu su akumuliacinėmis talpyklomis centralizuotai tiekiamai energijai įrengtas daugelyje šalių – Švedijoje, Danijoje, Austrijoje, Suomijoje, Vokietijoje (4.8 pav.). Šie kolektoriai įrengiami orientuoti į pietus, o posvyrio kampas nustatomas atskirai atsižvelgiant į esamą vietovę bei saulės kolektoriaus tipą. Tarpas tarp šių kolektorių eilių taipogi nustatomas atsižvelgiant į pačių įrengimų specifikacijas bei tipą [11].

Paprastai didelio ploto plokščiųjų saulės kolektorių jėgainės yra projektuojamos eilėmis iki 20 kolektorių vienetų. Dažniausiai 3 – 4 m² žemės ploto yra reikalingi vienam plokščiajam saulės kolektoriui. Jeigu yra žinomas kolektoriaus tipas, atstumas tarp saulės kolektorių eilių, fluido įtekėjimo ir ištekėjimo temperatūros, akumuliacinės talpyklos pajėgumas – galia, paprastai nustatyti saulės kolektorių posvyrio kampą nėra sunku [11].



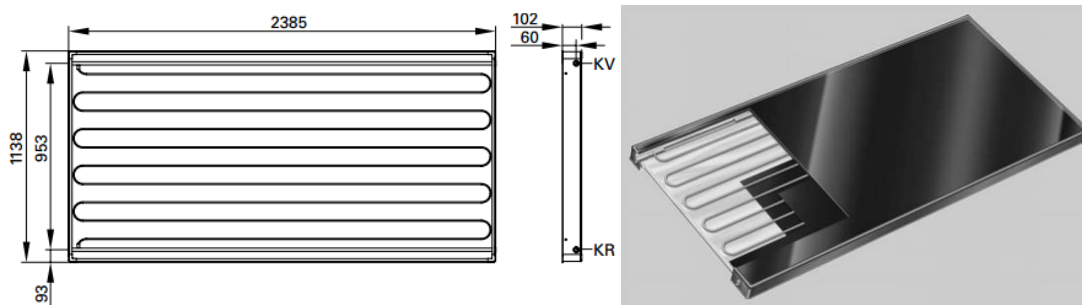
4.8 pav. Saulės kolektorių įrengto parko Danijoje pavyzdys

4.5.1 Saulės kolektorių parinkimas

Parengame „VIESSMANN“ Vokietijos kompanijos gaminamus plokštinius saulės kolektorius VITOSOL 100 w.2.5 [12]. Šio tipo plokštieji saulės kolektoriai pasižymi ilgaamžiškumu, patvarumu, aukštu efektyvumu bei mažais šilumos nuostoliais. Jie yra tinkami įrengti tiek ant pastatų, akumuliacinių talpyklų stogų, tiek ant žemės paviršiaus. Išsamesni parengamo saulės kolektoriaus parametrai pateikiami 4.2 lentelėje bei pavaizduojami (4.9 pav.).

4.2 lentelė. Saulės kolektorių parinkimas

Saulės kolektoriaus parametų pavadinimas	Parametų reikšmės
Saulės kolektoriaus pavadinimas:	VITOSOL 100 – w.2.5
Saulės kolektoriaus tipas:	Horizontalus plokštelinis ant žemės montuojamas
Absorberio paviršiaus plotas:	2,5 m ²
Matmenys (ilgis, plotis, storis)	2385 x 1138 x 102mm
Efektyvumas:	84%
Šilumos nuostolių koeficientas k_1	3,36 W(m ² ·k)
Šilumos nuostolių koeficientas k_2	0,013 W(m ² ·k)
Svoris:	60kg
Darbinis slėgis:	6bar



4.9 pav. Plokščiasis saulės kolektorius VITOSOL 100- w.2.5

4.5.2 Saulės kolektorių projektavimas ir energetinė analizė

Naudodamiesi programine įranga „PV Case“ suprojektavome plokštelių saulės kolektorių lauką ant PIT tipo akumuliacinės talpyklos.

- Saulės kolektoriai VITOSOL 100 – w.2.5 projektuojami eilėmis iki 20 kolektorių.
- Saulės kolektorių optimalus posvyrio kampas priimamas 37°.
- Tarpai tarp saulės kolektorių eilių priimami minimalūs 3 m, kad neįvyktų papildomo šešėliavimo.
- Priimame, kad saulės kolektoriai pašildo vandenį nuo 30°C iki 70 °C, paimdami vandenį iš žemutinės talpyklos dalies ir grąžindami jį į viršutinį akumuliacinės saugyklos sluoksnį.
- Priimame, kad maksimali teorinė saulės apšvieta G ant saulės kolektoriaus yra: 600 – 800 W/m².

Apskaičiuojame vieno saulės kolektoriaus galią, kW (1) [11]:

$$P_g = A_c [\eta_{kol} \cdot G - k_1(T_m - T_a) - k_2(T_m - T_a)^2] \cdot F_p \cdot F_u \cdot F_0 \quad (1)$$

čia P_g – vieno plokštelinio saulės kolektoriaus galia, kW; A_c – saulės kolektoriaus absorbuojamas plotas, m²; η_{kol} – saulės kolektoriaus efektyvumas, įvertinant vidutinės temperatūros T_m ir aplinkos temperatūros T_a skirtumą; k_1 – pirmasis šilumos nuostolių koeficientas, W/(K·m²); k_2 – antrasis šilumos nuostolių koeficientas, W/(K·m²); G – teorinė saulės apšvieta ant saulės kolektoriaus, W/m²; T_a – aplinkos oro temperatūra, °C; T_m – vidutinė temperatūra tarp įeinančio fluideo ir išeinančio; F_p – saugos koeficientas, atsižvelgiantis į vamzdžio šilumos nuostolius kolektoriuje ir perdavimo linijose, priimame 0,98; F_u – saugos veiksnys, atsižvelgiantis į matavimo neapibrėžtį, priimame 1; F_0 – kitų dalykų saugos veiksnys gali būti priimtas nuo 0,95 – 1, kad būtų atsižvelgta į netinkamą srauto paskirstymą ir nenumatytus šilumos nuostolius.

$$P_g = 2,5[0,6 \cdot 800 - 3,36(50 - 12) - 0,013(50 - 12)^2] \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 = 0,819 \text{ kW}$$

Vidutinė temperatūra tarp įeinančio fluideo ir išeinančio yra apskaičiuojama (2) [11]:

$$T_m = \frac{T_{i\acute{e}j.} + T_{i\acute{s}e\acute{j}.}}{2} \quad (2)$$

Čia $T_{i\acute{e}j.}$ – šaltesniojo fluideo įtekėjimo temperatūra (priimame 30 °C); $T_{i\acute{s}e\acute{j}.}$ – pašildyto fluideo ištekėjimo temperatūra (priimame 70 °C);

$$T_m = \frac{30 + 70}{2} = 50 \text{ °C}$$

Naudodamiesi programine įranga „PV Case“ suprojektavome plokštelių saulės kolektorių lauką ant PIT tipo akumuliacinės talpyklos. Gavome, kad į esantį 22500 m² plotą telpa 3660 saulės kolektoriai.

Visos saulės kolektorių jėgainės, neįskaičiuojant šilumos nuostolių, įrengtoji šiluminė galia būtų apskaičiuojama (3) [11]:

$$P_v = P_g \cdot P_s \quad (3)$$

čia P_g – vieno plokščio saulės kolektoriaus galia, kW; P_s – plokščiųjų saulės kolektorių kiekis, vnt.

$$P_v = 0,819 \cdot 3660 = 3000 \text{ kW} = 3 \text{ MW}$$

Kadangi per metus iš saulės energijos šiluma būtų gaminama 275 dienas, tai šilumos energijos būtų pagaminama (4) [11]:

$$E = P_v \cdot T_d \cdot T_h \quad (4)$$

čia P_v – visos saulės kolektorių jėgainės galia (be šilumos nuostolių), kW; T_d – dienų skaičius, kuomet šilumą gamintų plokštieji saulės kolektoriai; T_h – vidutinis dienos valandų skaičius dirbant saulės kolektoriams.

$$E = P_v \cdot 275 \cdot 14,55 = 12002,23 \text{ MWh}$$

Detalizuojant saulės šilumos energijos gamybos metinius skaičiavimus buvo atlikti šie veiksmai: iš pradžių buvo įvertintas detalesnis plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumas kiekvienam metų mėnesiui, atsižvelgiant ar yra šildymo, ar nešildymo sezonas. Pateikiame skaičiavimo pavyzdį liepos mėnesiui, kur saulės kolektoriaus naudingo veikimo koeficientas yra apskaičiuojamas (5) [11]:

$$\eta_{kol} = \eta_{max} - \frac{(k_1 \cdot (T_{išėj.} - T_a))}{G_{vas.}} - \frac{(k_2 \cdot (T_{išėj.} - T_a)^2)}{G_{vas.}} \quad (5)$$

čia η_{max} – teorinis maksimalus plokščio saulės kolektoriaus efektyvumas; $G_{vas.}$ – saulės apšvieta ant saulės kolektoriaus vasaros periodu, W/m²; T_a – aplinkos oro temperatūra, °C; $T_{išėj.}$ – pašildyto fluideo ištekėjimo temperatūra (priimame 70 °C); k_1 – pirmasis šilumos nuostolių koeficientas, W/(K·m²); k_2 – antrasis šilumos nuostolių koeficientas, W/(K·m²);

$$\eta_{kol} = 0,84 - \frac{(3,36 \cdot (70 - 20,5))}{600} - \frac{(0,013 \cdot (70 - 20,5)^2)}{600} = 0,616$$

Įvertinus mėnesinį kolektorių efektyvumą buvo apskaičiuotas pagamintos šilumos kiekis per mėnesį (kWh/m²), kuris nustatomas kolektoriaus naudingo veikimo koeficientą dauginant iš saulės spinduliuotės į pasvirusį paviršių kWh/m²:

$$Q_G = \eta_{kol} \cdot q_{saul.s.} \quad (6)$$

čia η_{kol} – saulės kolektoriaus naudingo veikimo koeficientas liepos mėn.; $q_{saul.s.}$ – saulės spinduliuotė į pasvirusį paviršių, kWh/m².

$$Q_G = 0,616 \cdot 161 = 99 \text{ kWh/m}^2$$

Atsižvelgus į turimą žemės plotą, skirtą plokštiesiems saulės kolektoriams, kuris yra 22500m² šilumos gamyba per mėnesį (MWh) yra apskaičiuojama pagamintą šilumos kiekį kWh/m² padauginus iš saulės kolektorių ploto:

$$Q_M = Q_G \cdot A_K / 1000 \quad (7)$$

čia Q_G – pagamintas šilumos kiekis per mėn, kWh/m²; A_K – saulės kolektorių plotas, m².

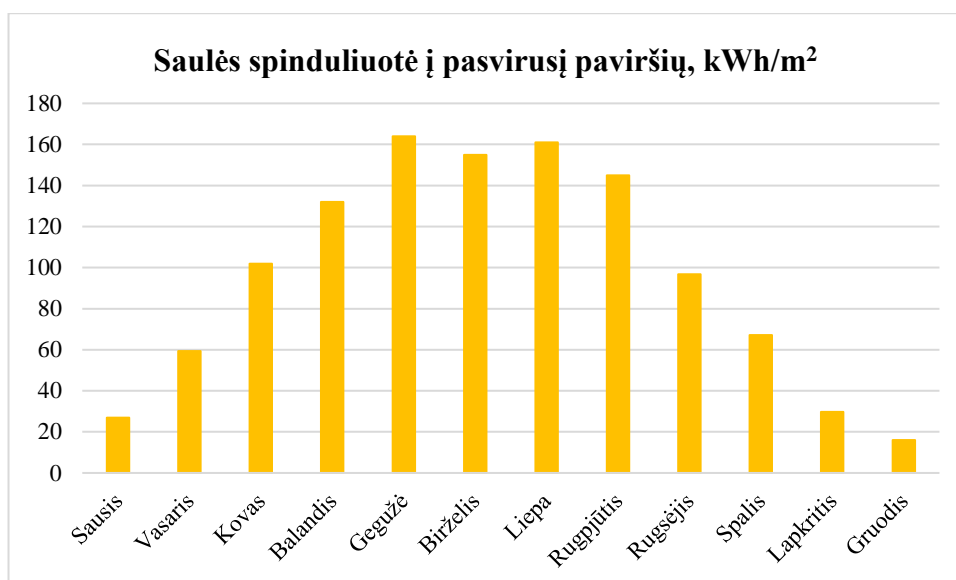
$$Q_M = 99 \cdot 22500 / 1000 = 2231,06 \text{ MWh}$$

Visų mėnesių šildymo ir nešildymo sezonų tiksliai saulės šilumos energijos gamybos reikšmes pateikiame 4.3 lentelėje:

4.3 lentelė. Plokščiųjų saulės kolektorių šilumos energijos gamyba per metus, MWh

Saulės kolektorių šilumos energijos gamyba per metus									
Mėnuo	Saulės spindulių plokščiai paviršių kWh/m ²	Saulės spindulių pasvirusį paviršių kWh/m ²	Dienų skaičius	Vidutinė lauko oro temp. °C	Temp. už kolektoriaus	Kolektoriaus nvk	Pagamin-ta šilumos, kWh/m ²	Kolektorių plotas m ²	Gamyba per mėn. [MWh]
Sausis	16	27	31	-5	50,00	0,09	3	22500	56,5
Vasaris	33	59,4	28	-5	50,00	0,09	6		124,2
Kovas	70	102	31	-2	70,00	0,26	26		592,6
Balandis	99	132	30	10	70,00	0,32	43		962,3
Gegužė	146	164	31	17	70,00	0,60	99		2229
Birželis	155	155	30	19	70,00	0,61	95		2130
Liepa	150	161	31	20,5	70,00	0,62	99		2231
Rugpjūtis	138	145	31	20	70,00	0,61	89		2003
Rugsėjis	90	96,8	30	14,5	70,00	0,55	53		1192
Spalis	52	67,2	31	8	70,00	0,31	21		472,0
Lapkritis	16	29,7	30	3	70,00	0,28	8		189,9
Gruodis	9	16,1	31	-2	55,00	0,06	1		22,03
Viso per metus	974	1155	275	12	70	0,5	542		12002

Iš atliktos skaičiavimo analizės pastebime, kad didžiausia saulės spinduliuotė į pasvirusį saulės kolektorių būtų gegužės ir liepos mėnesiais, kur reikšmės siektų net 164 – 161 kWh/m². Vasaros periodu saulės spinduliai yra intensyviausi, todėl galima žymiai daugiau generuoti šilumos energijos. Susikaupusią perteklinę šilumos energiją paranku kaupti didelėse požeminėse akumuliacinėse sistemose, taip prailginant šilumos gamybos periodą iš saulės energijos. Kaip pastebime, žiemos mėnesiais (gruodį, sausį, vasarį) iš saulės energijos gaminti šilumos energiją neapsimoka, nes saulės spinduliuotė yra pakankamai maža, o ir pačių saulės kolektorių efektyvumas ženkliai krenta (4.10 pav.).



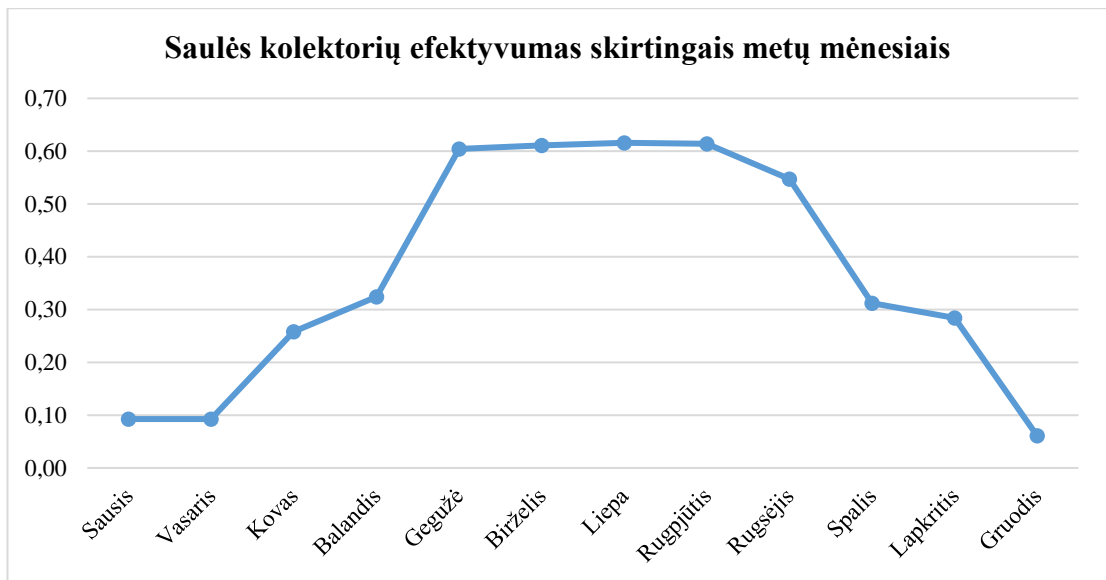
4.10 pav. Saulės spinduliuotė į pasvirusį paviršių Kauno rajone

Saulės kolektoriai dirbtų šildymo ir nešildymo sezonais, o tai lemia skirtingas saulės apšvietas (W/m^2). Priėmėme, kad vasaros periodu maksimali saulės apšvietas Kauno rajone būtų $600 W/m^2$, o žiemos periodu $300 W/m^2$. Pateikiame 4.4 lentelėje patikslintus pagrindinius plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumo rodiklius:

4.4 lentelė. Plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumo rodikliai

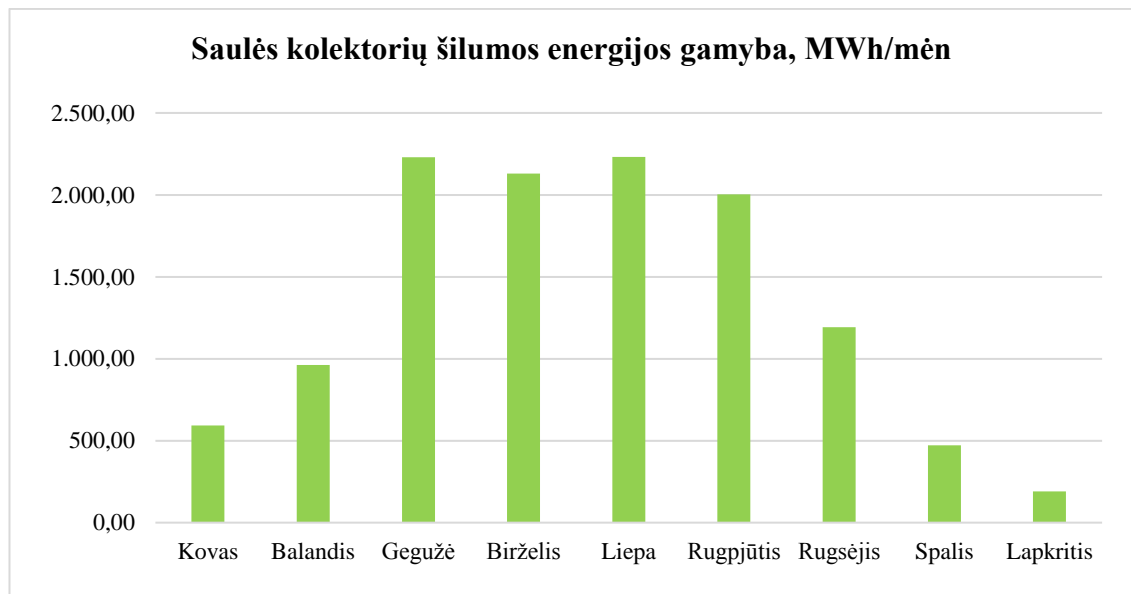
Saulės kolektoriaus efektyvumas		
Maksimalus efektyvumas jeigu nėra šilumos nuostolių	-	0,84
1 klasės šilumos nuostolių koeficientas	$W/m^2 \cdot K$	3,36
2 klasės šilumos nuostolių koeficientas	$W/m^2 \cdot K$	0,01
Vidutinė nešildymo periodo saulės apšvietas ant kolektoriaus	W/m^2	600,00
Vidutinė šildymo periodo saulės apšvietas ant kolektoriaus	W/m^2	300,00
Ekspluatacijos laikas	metai	25,00
Šilumos gamyba nešildymo periodu	kWh/m^2	434,91
Šilumos gamyba šildymo periodu	kWh/m^2	98,52
Kolektoriaus naudingo veikimo koeficientas vasaros – nešildymo periodu	%	0,60
Kolektoriaus naudingo veikimo koeficientas žiemos – šildymo periodu	%	0,29

Taipogi iš atliktos analizės pastebime, kad aukščiausias plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumas yra birželio – liepos – rugpjūčio mėnesiais, apskaičiuotos naudingo veikimo koeficientas siekia 0,62 (4.11 pav.). Pasiiekti maksimalų naudingo veikimo koeficientą yra sunku, galutinę reikšmę įtakoja pirmosios ir antrosios klasės šilumos nuostolių koeficientai, taipogi saulės kolektorių efektyvumas priklauso ir nuo pačios saulės apšvietos skirtingais sezono laikotarpiais (W/m^2).



4.11 pav. Saulės kolektorių efektyvumas skirtingais metų mėnesiais

Daugiausia šilumos energijos būtų pagaminama gegužės mėnesį – 2228,99 MWh ir liepos mėnesį 2231,06 MWh, o mažiausiai energijos generuojama būtų rudens periodu – lapkričio mėnesį 189,87 MWh. Kaip pastebime palankiausias periodas gaminti šilumą iš saulės energijos būtų nuo balandžio mėnesio iki rugsėjo mėnesio galo (4.12 pav.).



4.12 pav. Saulės kolektorių šilumos energijos gamyba, MWh/mėn

Įvertinant tai, kad plokštieji saulės kolektoriai dirbtų kovo – lapkričio mėnesiais iš saulės energijos būtų išgaunama 12002,23 MWh šilumos energijos, kuri būtų naudojama PIT akumuliacinės talpyklos vandens šildymui. Iš saulės kolektorių pašildyto grįžtančio vandens temperatūra siektų 70 °C.

Vamzdžių šilumos nuostoliai tarp saulės kolektorių lauko ir centralizuoto šilumos tinklo prijungimo vietos:

Šio suprojektuoto saulės kolektorių lauko plotas yra 22500m², o kadangi, atstumas tarp kolektorių lauko ir centralizuoto šildymo tinklo prijungimo taško yra 0,5 km, tai šilumos nuostoliai sudarytų tik 1% nuo bendro saulės kolektorių šiluminės galios [8].

Vamzdynų šilumos nuostoliai būtų apskaičiuojami [8]:

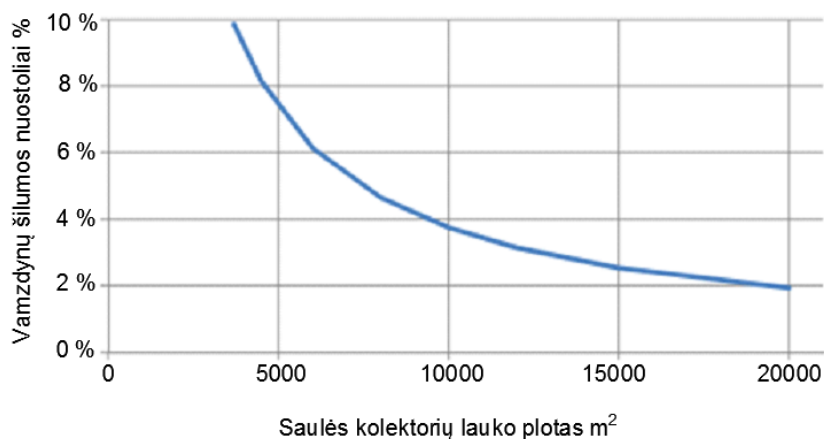
$$Q_v = E \cdot 1\% \quad (8)$$

$$Q_v = 12002,23 \cdot 1\% = 120,02 \text{ MWh}$$

Bendroji šiluminė galia būtų apskaičiuojama[8]:

$$Q_g = E - Q_v \quad (9)$$

$$E_g = 12002,23 - 120,02 = 11882,21 \text{ MWh}$$

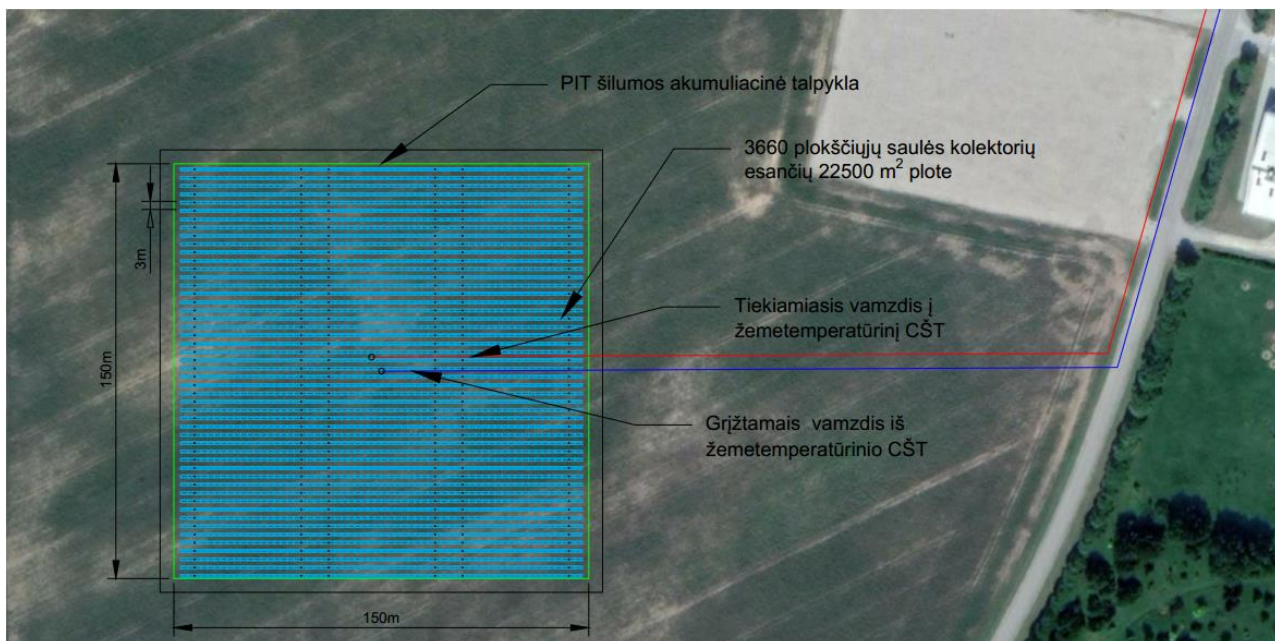


4.13 pav. Vamzdynų (tiekiamojo ir grįžtamojo) šilumos nuostoliai (1km) tarp kolektoriaus lauko ir centralizuoto šildymo tinklo prijungimo taško

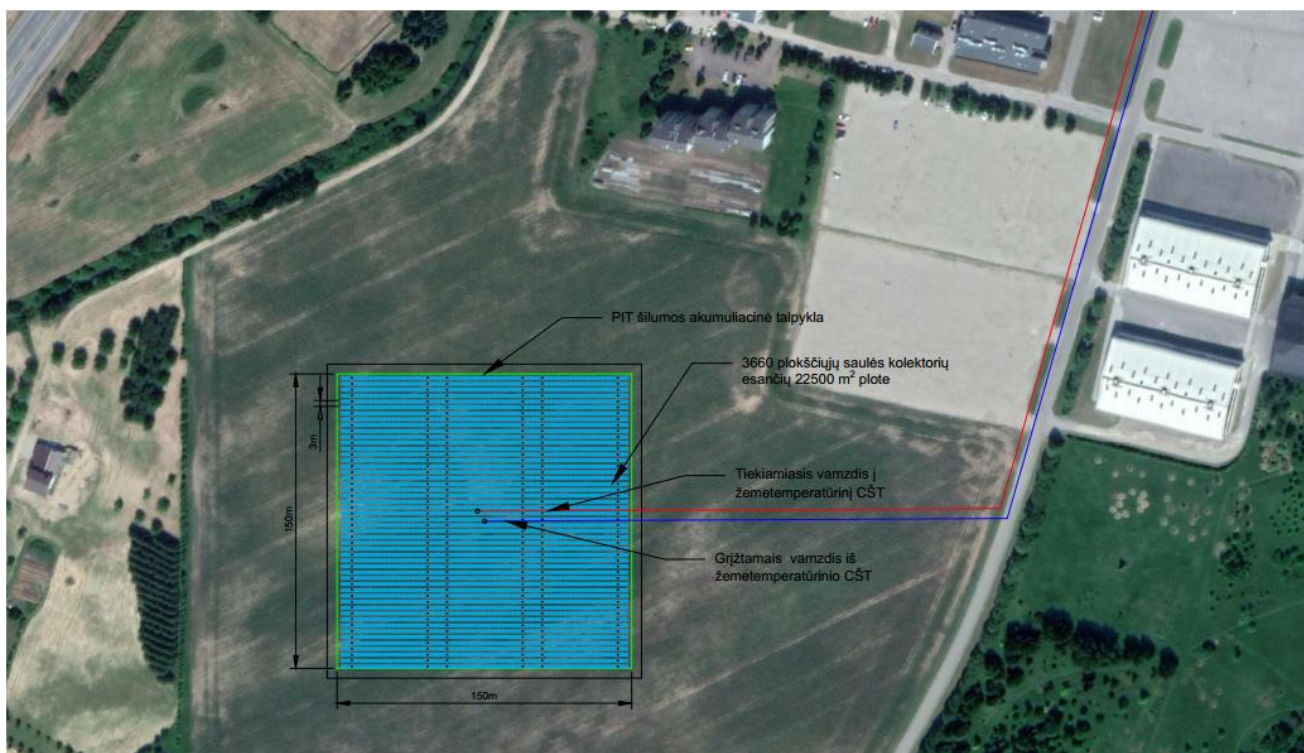


4.14 pav. Projektuojamas plokščiųjų saulės kolektorių laukas

Naudojantis „PVCASE“ ir AutoCAD programiniais paketais suprojektuotas plokščiųjų saulės kolektorių parkas ant PIT tipo akumuliacinės talpyklos. Saulės kolektorių optimalus posvyrio kampas priimtas 37° , o tarpai tarp saulės kolektorių eilių priimti minimalūs 3 m, kad neįvyktų papildomo šešėliavimo. Pateikiame suformuotas schemas (4.5 ir 4.6 pav.) bei galimas ateities žemos temperatūros tinklų integracijas į bendrą Akademijos miestelio centralizuotą šilumos tinklą.



4.15 pav. Suprojektuotas saulės kolektorių laukas ant akumuliacinės talpyklos

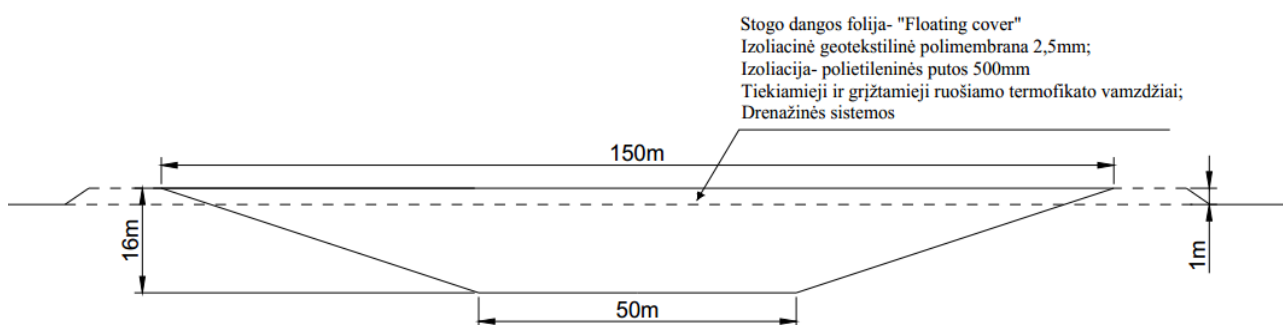


4.16 pav. Suprojektuoto saulės kolektorių lauko integraciją į Akademijos miestelio CŠT sistemą

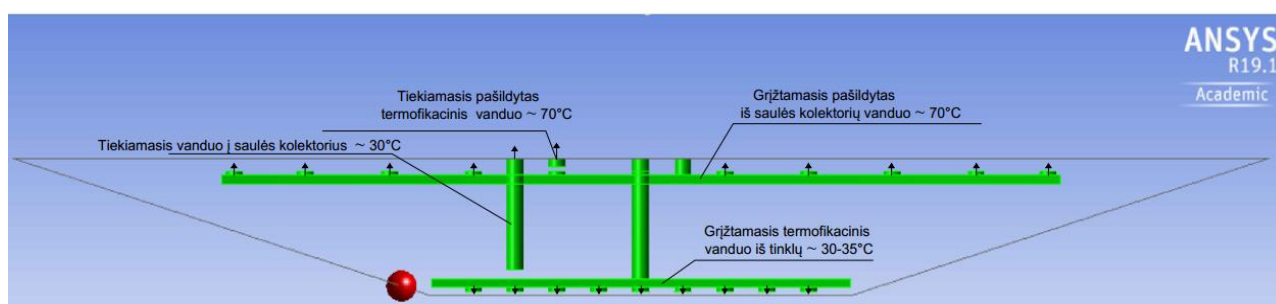
5. Šilumos akumuliacinės talpyklos projektavimas

Projektuojama 170000m³ akumuliacinė vandens talpykla Kauno rajone Akademijos miestelyje. Talpykla į gruntą žemyn būtų kasama 15 metrų, ir 1 metras būtų virš žemės paviršiaus. Numatoma daniško tipo talpykla, kurios sienos ir dugnas nėra papildomai izoliuojamas, vietoj to naudojama geotekstilinė polimembraninė danga 2,5mm storio, o viršutinė dalis būtų sudaryta iš plaukiojančio paviršiaus. Talpyklos viršus būtų sudarytas iš geotekstilinės polimembraninės dangos 2,5mm, papildomos talpyklos viršutinės dalies stogo folijos 2mm, izoliacijos 500mm, viršutiniojo papildomojo sluoksnio 1,5mm, klojamų termofikato vamzdžių bei drenažinių vandens sistemų (5.1 pav.).

Akumuliacinė talpykla projektuojama tiesioginio kaupimo, be papildomų vidinių šilumokaičių, kadangi tokiu būdu būtų mažesni šilumos nuostoliai bei mažesni ekonominiai kaštai. Šilumos energija kaupiama iš saulės energijos ir plokščiųjų saulės kolektorių pagalba vamzdynais pašildytas vanduo tiekiamas į PIT talpyklą. Iš saulės kolektorių vanduo būtų pašildomas iki ~70°C. Atiduodant sukauptą šilumos energiją pašildytas vanduo ~70°C tiekiamas iš karščiausios ir aukščiausios vietos (2m gylio) į žema – temperatūrinį tinklą pro pagrindinį tiekiamąjį vamzdį. Grįžtamasis termofikacinis vanduo yra grąžinamas kitu vamzdžiu esančiu talpyklos vidaus centre. Grąžinamas šaltesnis termofikacinis vanduo ~ 30°C talpinamas į žemiausią saugyklos vietą, į 14 metrų gylį (5.2 pav.).

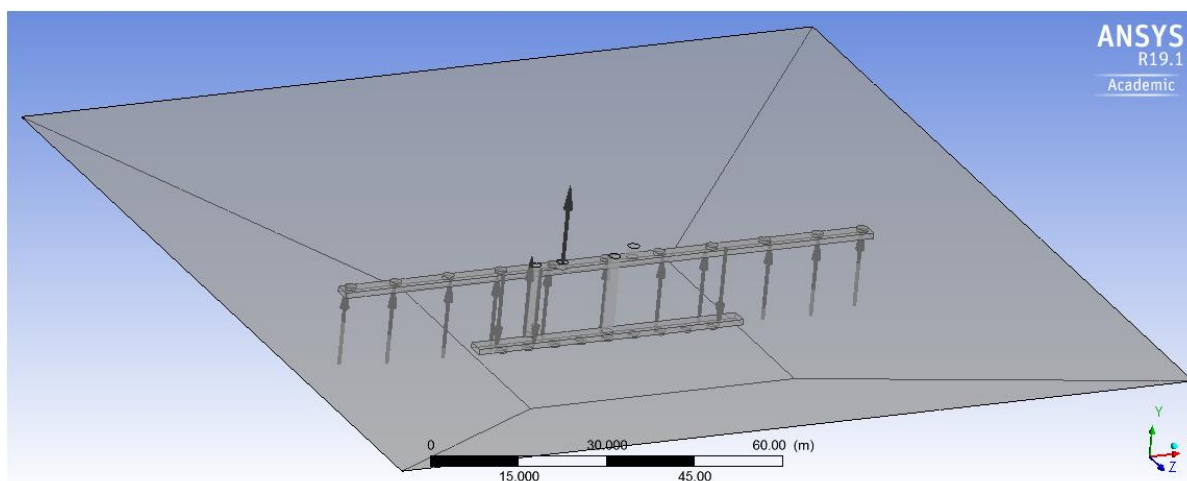


5.1 pav. Projektuojamos PIT tipo šilumos akumuliacinės talpyklos konstrukcijos skerspjūvis



5.2 pav. Projektuojamos šilumos akumuliacinės talpyklos energetiniai srautai

Pasinaudojus „ANSYS“ energijos modeliavimo programa, buvo suprojektuota PIT akumuliacinė talpykla. Pavaizduotuose schemose (5.3 pav.) ir (5.4 pav.) vaizduojami tiekiamojo ir grįžtamojo termofikacinio vandens vamzdžiai esantys talpykloje, taipogi nurodomos jų tekėjimo kryptys. Brėžiniuose taip pat atvaizduojamas tiekiamasis vandens vamzdis į saulės kolektorius bei grįžtamojo pašildyto vandens iš saulės kolektorių vamzdis su jų tekėjimo kryptimis.

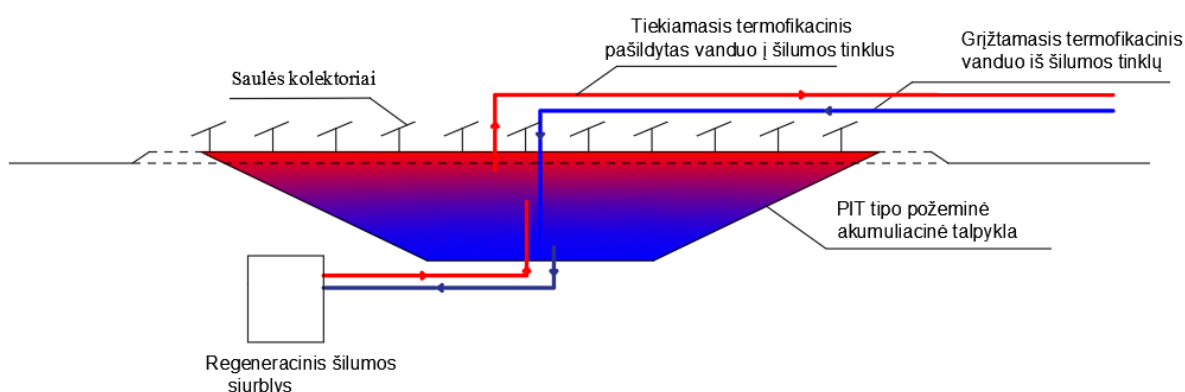


5.3 pav. Projektuojamos šilumos akumuliacinės talpyklos 3D vaizdas su srautų kryptimis

Šioje akumuliacinėje talpoje vanduo iš saulės kolektorių bus kaitinamas iki $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, ir tokiu būdu pašildytas vanduo bus tiekiamas į žema – temperatūrinį šilumos tinklą miestelio vartotojams (5.4 pav.). Iš įgyvendintų realių pavyzdžių priimame, kad vandenyje sukaupiamas šilumos energijos kiekis yra 70 kWh/m^3 .

Projektuojant šią talpyklą tenkiname reikalavimus: gruntas yra tvirtas ir stabilus bei požeminėse erdmėse nėra požeminių vandenų 5 – 15 metrų gylyje.

Taip pat reikia atsižvelgti, kad prieš vandeniu užpildant PIT akumuliacinę talpyklą, vanduo privalo būti paruoštas visomis minkštinimo priemonėmis. Turi būti paruošta technologinė vandens minkštinimo sistema, visi reikalingi įrenginiai, kurių pagalba vanduo bus tiekiamas į talpyklą.

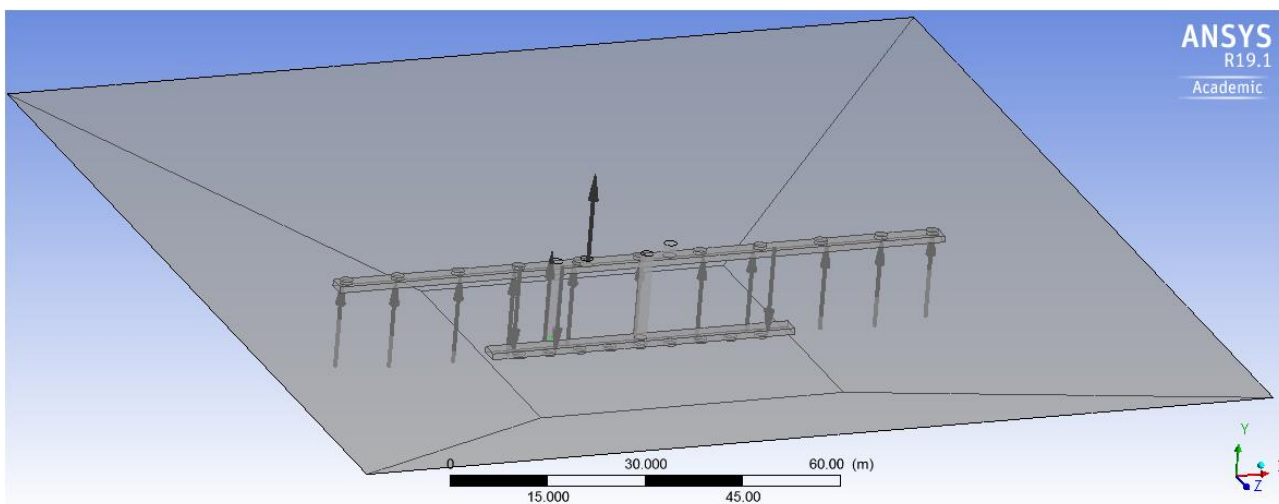


5.4 pav. Akumuliacinės talpyklos principinė schema

5.1 Šilumos akumuliacinės talpyklos modeliavimas

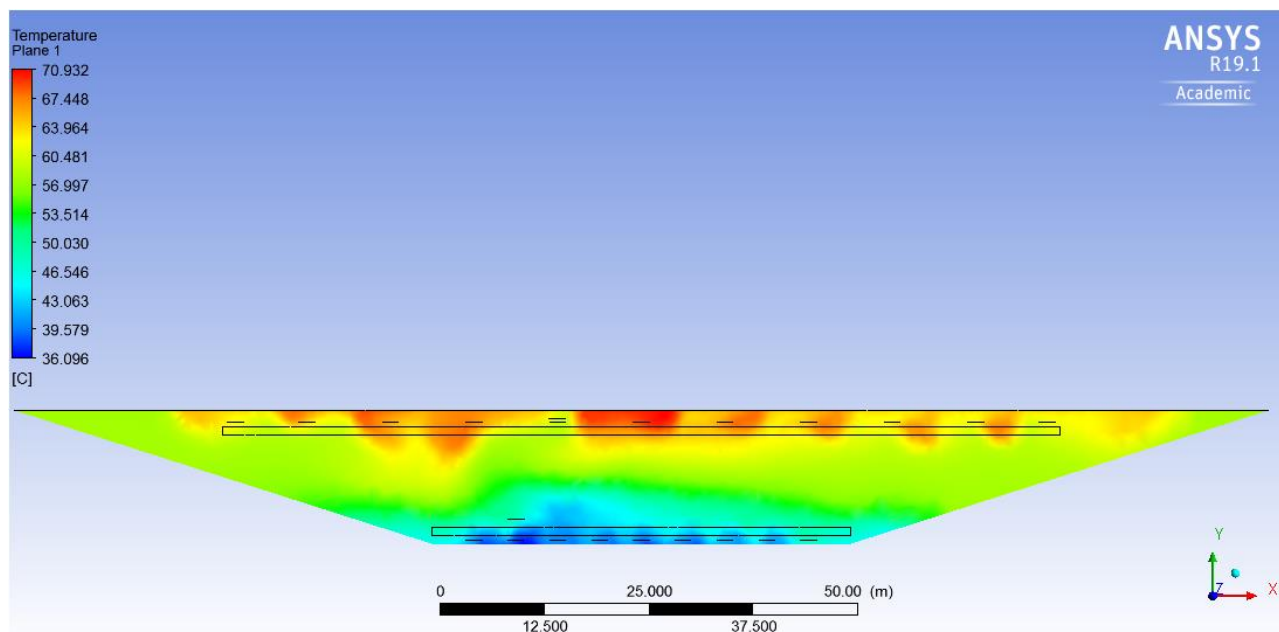
Naudojantis fluidų tekėjimo modeliavimo programa „ANSYS (CFX)“ buvo sumodeliuota 170000m^3 PIT tipo akumuliacinė talpykla (5.5 pav.). Programoje nusistatėme, kad grįžtamasis termofikacinis vanduo iš žema–temperatūrinių šilumos tiekimo tinklų yra $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o šioje akumuliacinėje talpoje vanduo iš saulės kolektorių būtų kaitinamas iki 70°C . Taipogi buvo pasirinkta, kad vanduo į saulės kolektorius būtų imamas iš žemesniojo sluoksnio, kuriame vidutiniškai vandens temperatūra yra ~

30–36 °C. Priėmėme, kad iš viršutinio talpyklos sluoksnio pašildytas vanduo iki 70–75°C būtų tiekiamas į šilumos tinklus.



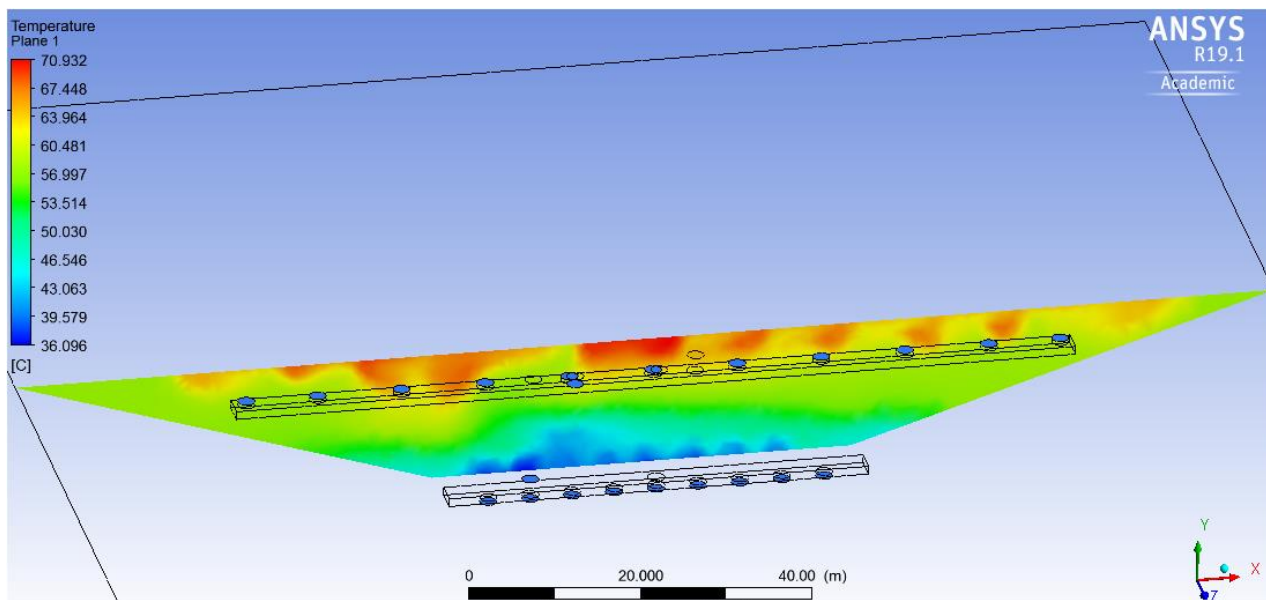
5.5 pav. PIT akumuliacinės talpyklos programinis vandens srautų kryptių nustatymas

Atlikę šiuos programinius nustatymus, gavome tokius rezultatus: pavyko programiškai sumodeliuoti stratifikacinę temperatūrinę pasiskirstymą esant skirtingiems talpyklos aukščių sluoksniams (5.6 pav.).



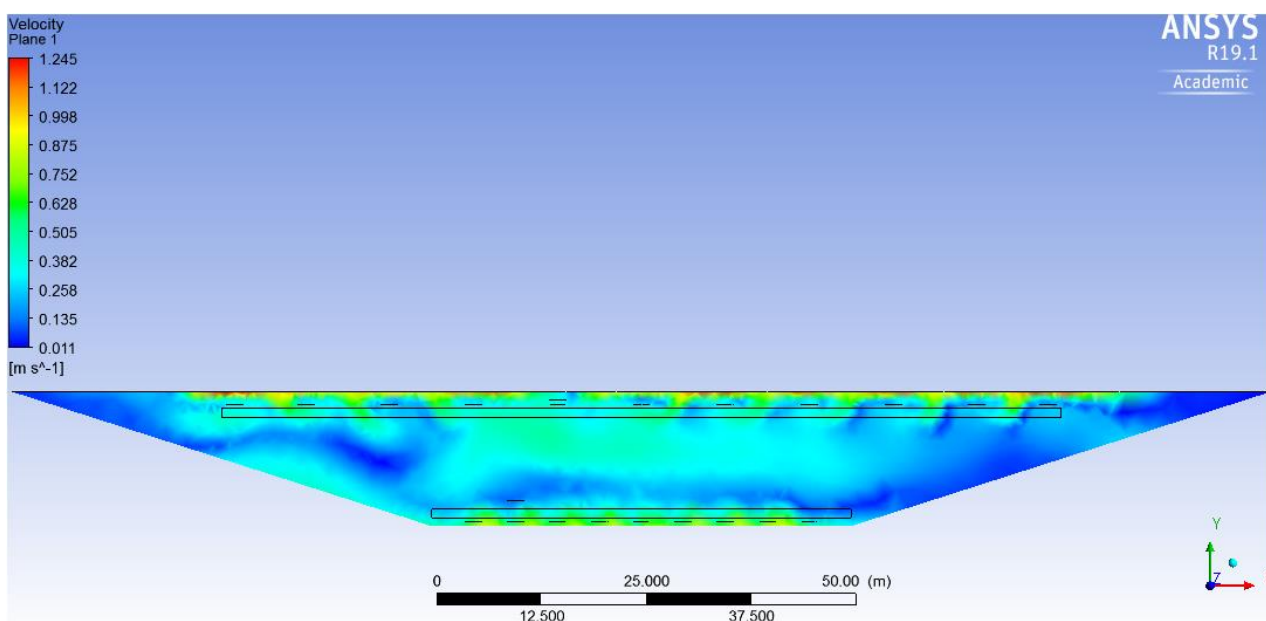
5.6 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas

Pastebime, kad talpyklos apačioje susiformuoja žemesnės temperatūros sluoksniai 30 – 40 °C. Talpyklos viduriniuose sluoksniuose vandens temperatūra aukšteja ir tampa artima 50 – 60 °C. Saugyklos viršuje pastebima, kad iš grįžtančio saulės kolektorių pašildyto vandens susiformuoja aukštesnių temperatūrų sluoksnis, kuris siekia 70 °C temperatūrą (5.7 pav.). Iš principo, tobulo stratifikacijos arba skirtingo tankio sluoksnių, kurie tarpusavyje visiškai nesimaišo pasiekti yra neįmanoma. Idealius temperatūrinius sluoksnius pasiekti yra sunku, kadangi vyksta intensyvūs šilumos mainai, vanduo iš apačios yra vėsinamas, o viršuje šildomas.

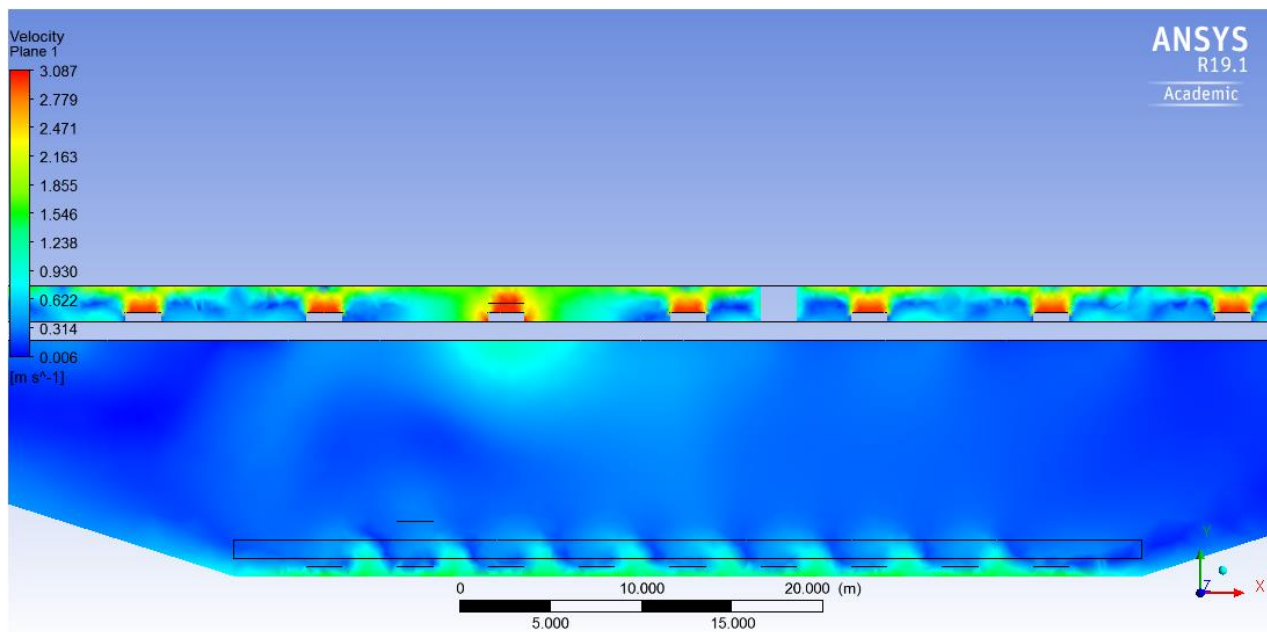


5.7 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinio pasiskirstymo brėžinys

Taip pat buvo sumodeliuotas greičių pasiskirstymas akumuliacinėje talpykloje. Pastebime, kad atlikus geometrinį pjūvį ties talpyklos viduriu, vandens srautai juda nevienodu greičiu. Didžiausias vandens srauto greitis yra ties vandens išpurškimo vietomis (5.8 pav.).



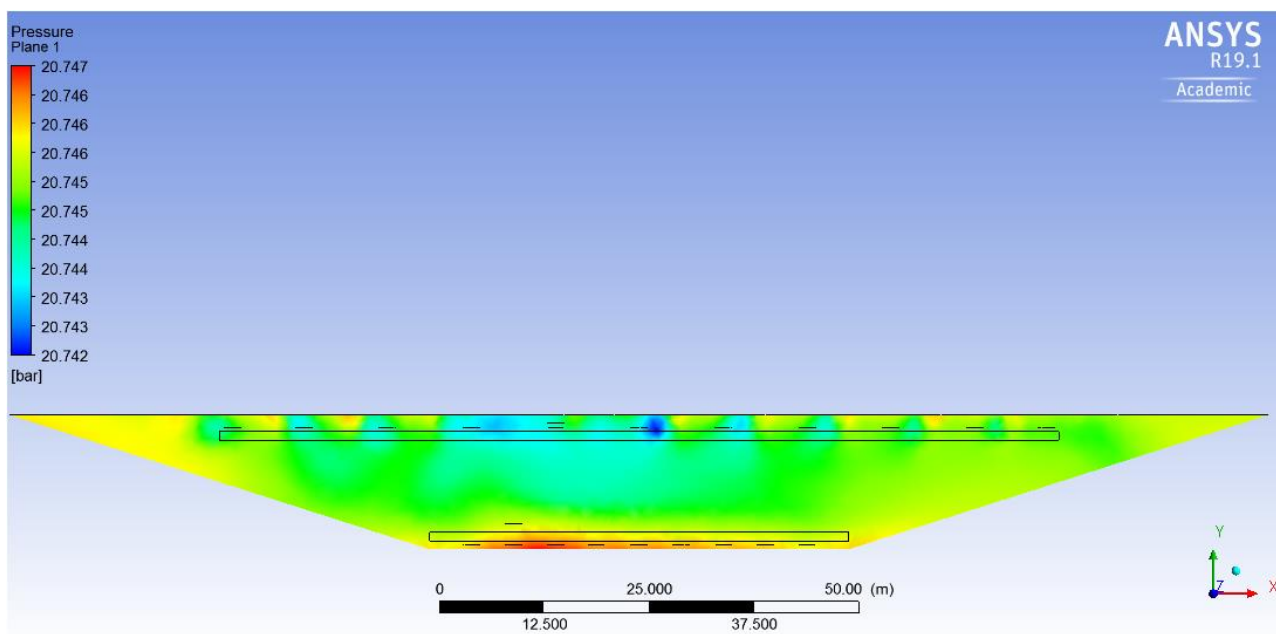
5.8 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymo brėžinys



5.9 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymas vandens purškimo zonose

Kaip pastebime esant vandens išpurškimo vietoms, vandens srauto greitis gali pasiekti net 3m/s. Talpyklos viduje vandens srautas juda iki 0,5m/s greičiu (5.9 pav.).

Taip pat buvo gautas ir slėgių pasiskirstymo grafikas talpykloje. Deja programa rodo itin aukštą slėgį ~ 20 bar bei nežymų jo pasiskirstymą talpyklos viduje (5.10 pav.).



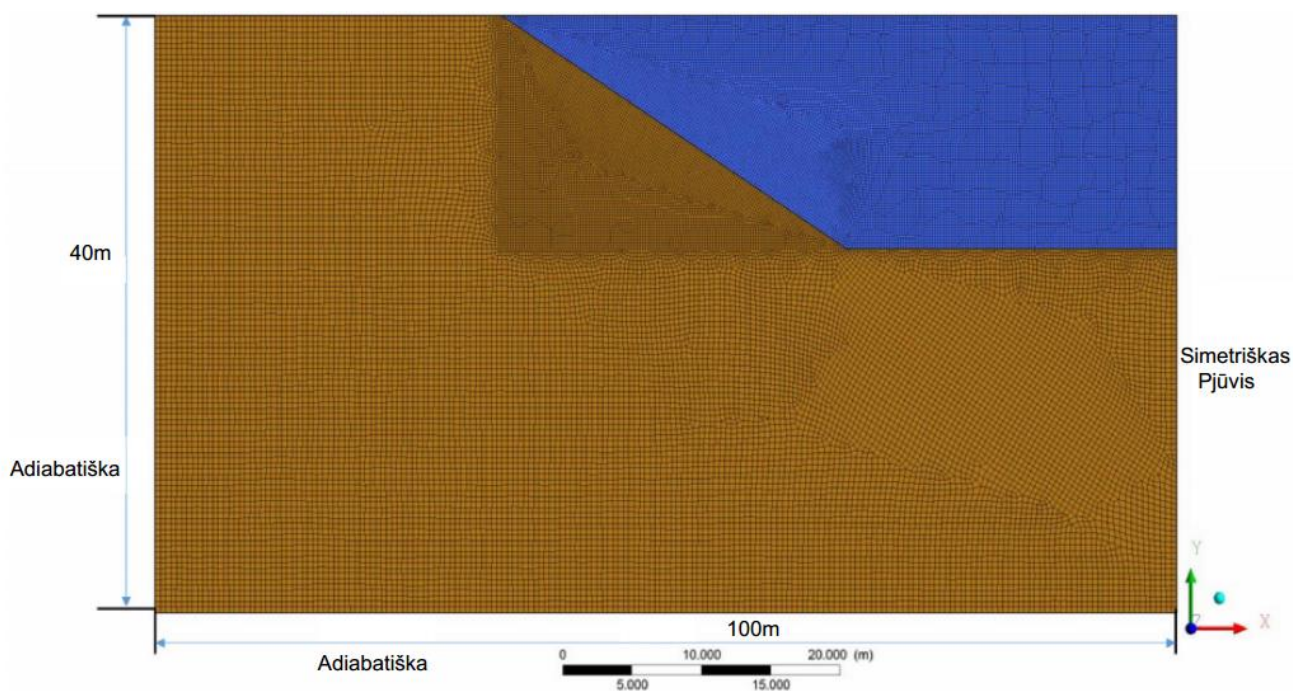
5.10 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio slėgių pasiskirstymo brėžinys

5.2 PIT šilumos akumuliacinės talpyklos šilumos nuostolių nustatymas ir modeliavimas

Vieni iš svarbiausių akumuliacinės talpyklos modeliavimo parametru – tai šilumos nuostoliai. Šiuo atveju nagrinėjamoje situacijoje šilumos nuostoliai susideda iš dviejų nuostolių: šilumos nuostoliai nuo viršutiniojo plaukiojančio akumuliacinės talpyklos dangčio į išorinės aplinkos orą ir nuostoliai nuo dugno ir šoninių paviršių iš talpykloje esančio vandens į aplinkui esantį gruntą.

Viršutinio plaukiojančio saugyklos dangčio šilumos nuostolių koeficientai nustatomi remiantis plūduriuojančio dangčio konstrukcija bei papildomais šilumos srauto jutiklių matavimais, o šoniniams ir apatiniams paviršiams šilumos nuostolių koeficientai ir ribinės sąlygos vertinamos imitaciniais modeliais, naudojant ANSYS modeliavimo programinį paketą.

Pavaizduojame akumuliacinės saugyklos ir aplink ją esančio grunto 2D modelį (5.11 pav.). Priimame, kad PIT talpykla yra simetriška, todėl modeliuojama tik pusė akumuliacinės talpyklos. Viso modelio matmenis modeliuojame 100 m x 40 m, siekiant sumažinti talpyklos šiluminę įtaką dugne ir šoniniuose ribiniuose paviršiuose. Priimame, kad talpyklai per 12 mėnesių laikotarpį nedaroma jokia įtaka saugyklos apačios ir šoniniams ribiniams paviršiams, todėl šie ribiniai paviršiai apibrėžiami kaip adiabatines sienos.



5.11 pav. Akumuliacinės vandens talpyklos ir aplink ją esančio grunto 2D modelis

Remiantis įgyvendintų Danijos projektų pavyzdžiais [13] ir atliekant detalesnę viršutiniųjų šilumos nuostolių analizę, pastebime, jog jie yra nustatomi pagal šilumos srauto jutiklių matavimus, esančius ant akumuliacinės talpyklos dangčio ir izoliacinių medžiagų savybes. Kadangi tai yra tik vieno taško matavimas fiksuotoje vietoje, tikslus visos talpyklos viršutiniojo dangčio šilumos nuostolių matavimas yra gan sudėtingas. Pavyzdžiui, matuojant šilumos nuostolius neįmanoma išmatuoti papildomų šilumos nuostolių, atsiradusių dėl periodinio viršutinio dangčio vėdinimo, šiluminių tiltų atsiradusių dėl esamų atvamzdžių bei įvairių technologinių jungčių, sumažėjusios deformuotos izoliacinės medžiagos. Todėl remiantis Marstal įgyvendintu projektu jutiklių pagalba vykdomi periodiniai šilumos nuostolių matavimai esant skirtingais metų laikotarpiais. Paprastai šilumos

srautas iš viršutiniojo talpyklos dangčio į aplinką svyruoja tarp 22 – 34 W/m² [13], tačiau šie šilumos nuostoliai labai priklauso ir nuo izoliacinės medžiagos storio. 5.1 lentelėje pateikti duomenys, kurie buvo išmatuoti vykdant Marstal PIT akumuliacinės talpyklos šilumos nuostolių į aplinką skaičiavimus.

5.1 lentelė. Šilumos nuostoliai nuo PIT talpyklos viršutiniojo plaukiojančio dangčio

Šilumos nuostoliai nuo talpyklos viršutiniojo plaukiojančio dangčio	
Pasirinkti skaičiuotini mėnesiai	Šilumos srautas į aplinką nuo viršutiniojo dangčio (W/m ²)
Spalio mėn.	34
Vasario mėn.	22
Balandžio mėn.	24,2
Rugpjūčio 3 mėn.	24,2

Iš šios lentelės matyti, kad tarp keturių tiriamųjų mėnesių šilumos srautas į aplinką yra didžiausias spalio mėnesį, o mažiausias vasario mėnesį. Tai galima paaiškinti temperatūros skirtumu tarp akumuliacinės talpyklos vandens viršutinio sluoksnio ir aplinkos oro. Spalio mėnesį talpykla turėjo palyginti aukštesnę temperatūrą dėl šilumos įkrovimo iš saulės kolektorių vasaros metu, kuomet aplinkos oro temperatūra buvo apie 10 – 20°C. Vasario mėn. aplinkos oro temperatūra yra daug mažesnė ir vandens temperatūra viršutiniame talpyklos sluoksnyje žiemos laikotarpiu ženkliai sumažėja dėl PIT talpyklos šilumos atidavimo tinklams.

Atsižvelgiant į realių įgyvendintų projektų gan didelius šilumos nuostolius į aplinką, pasirenkame efektyvią termoizoliacinę medžiagą - šilumos izoliacinės plokštes, pagamintas iš poliizocianurato putų. Šios medžiagos šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 0,023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [14], o sluoksnio storis $\delta = 50 \text{ cm}$.

Projektuojamai PIT akumuliacinei talpyklai Kauno r. Akademijos miestelyje viršutiniai šilumos nuostoliai į aplinką būtų apskaičiuojami [13]:

$$Q_{virš.} = A \cdot q \quad (10)$$

čia A – akumuliacinės talpyklos paviršiaus plotas, m²; q – vidutinis šilumos nuostolių srautas, W/m².

$$Q_{virš.} = 22500 \cdot 2,76 = 62100 \text{ W} = 62,1 \text{ kW}$$

Vidutinį šilumos nuostolių srautą (W/m²) apskaičiuojame šia formule:

$$q = \frac{t_2 - t_1}{R} \quad (11)$$

čia t_1 – aplinkos oro temperatūra, °C; t_2 – talpykloje esančio vandens temperatūra, °C; R – izoliacinės medžiagos šiluminė varža, m²K/W.

$$q = \frac{70 - 10}{21,74} = 2,76 \text{ W/m}^2$$

Izoliacinės medžiagos šilumos varžą apskaičiuojame šia formule:

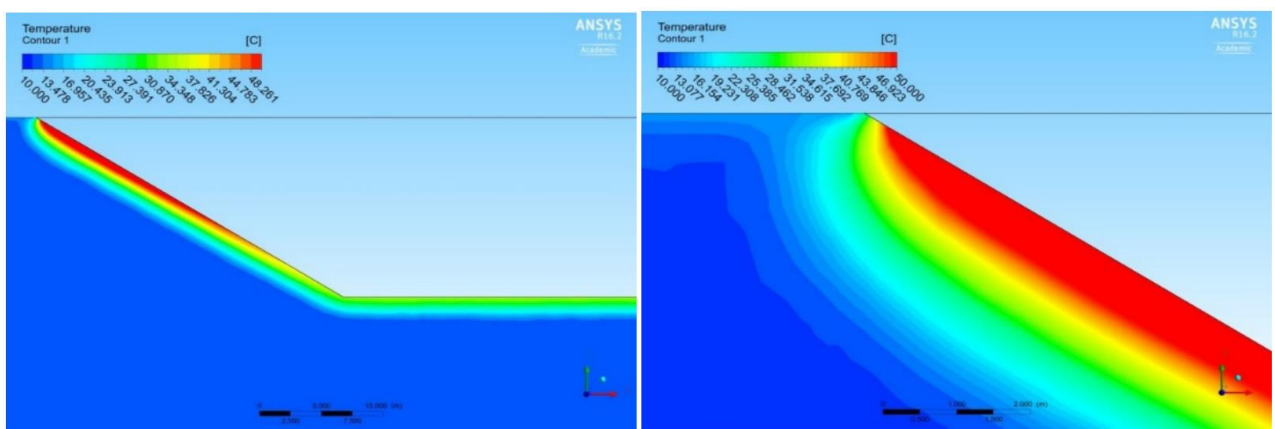
$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (12)$$

čia λ – šilumos laidumo koeficientas, $W/m \cdot K$; δ – izoliacinės medžiagos sluoksnio storis (m);

$$R = \frac{0,5}{0,023} = 21,74 \text{ m}^2\text{K/W}$$

5.2.1 Šoninių ir apatinių talpyklos paviršių šilumos nuostolių į gruntą modeliavimas

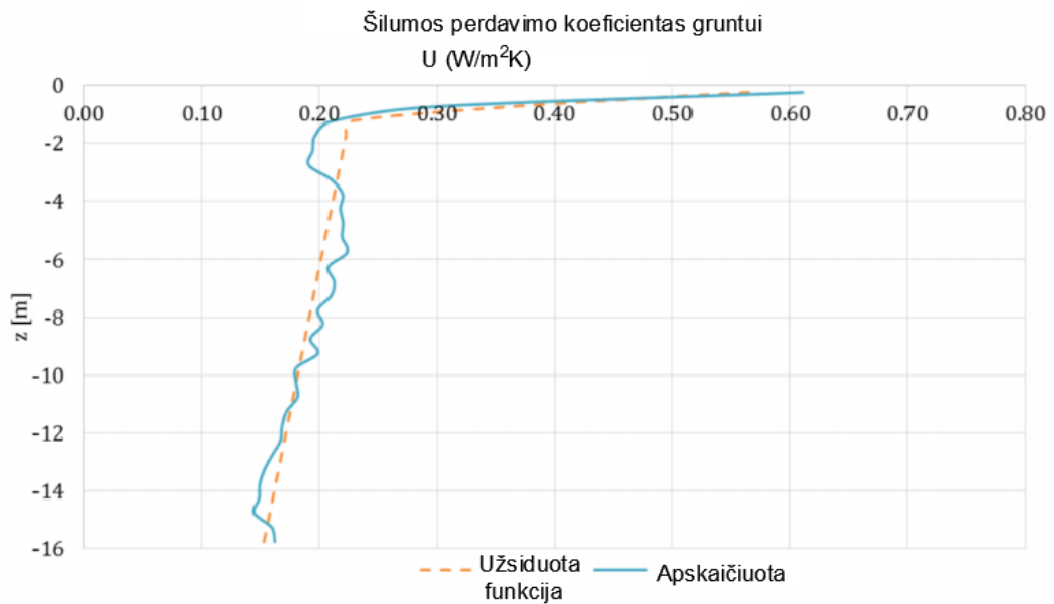
Šilumos nuostolius iš talpyklos į gruntą žymiai sunkiau įvertinti, nes juos lemia ne tik kasmetiniai aplinkos oro temperatūros svyravimai, bet ir šilumos perdavimas dirvožemyje. ANSYS CFX modeliavimo programos pagalba pavyko suformuoti PIT talpyklą bei jos temperatūrinę stratifikaciją, taipogi šio programinio paketo funkciniai pajėgumai leidžia analizuoti ir modeliuoti šoninių ir apatinių talpyklos paviršių šilumos nuostolius [13]. Atvaizduojame programos sumodeliuotą vertikalaus pjūvio grunto temperatūrinį pasiskirstymą aplink esančią PIT talpyklą (5.12 pav.).



5.12 pav. Vertikalusis grunto temperatūros pasiskirstymas aplink PIT talpyklą (kairėje: šoninis ir apatinis paviršius, dešinėje: padidintas vaizdas iš viršutinio talpyklos kampo)

Šis 2D modelis apskaičiuoja šilumos perdavimą tarp akumuliacinės talpyklos šoninių ir apatinių paviršių į aplinkui esantį gruntą, kuris naudojamas talpyklos paviršių šilumos nuostolių koeficientams nustatyti.

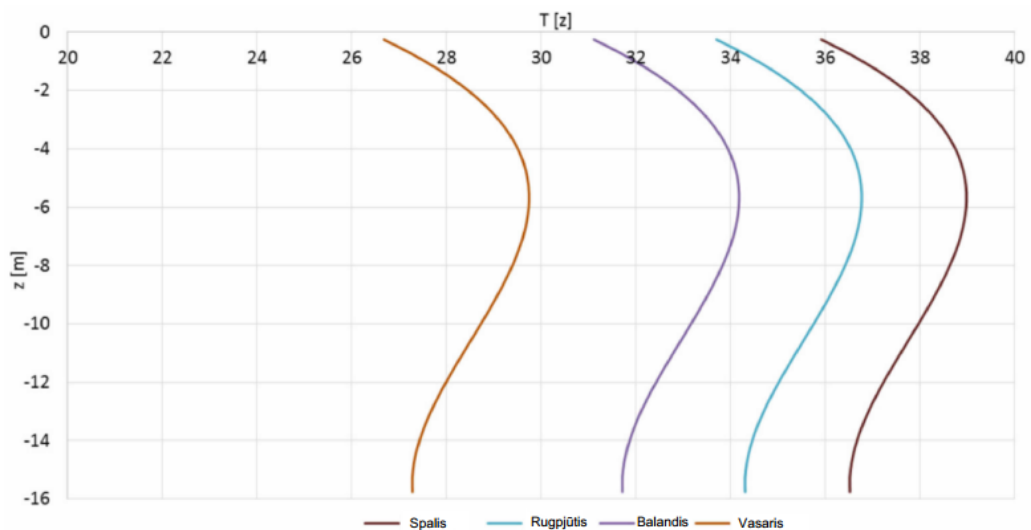
Pavaizduojame apskaičiuotus šilumos perdavimo koeficientus tarp akumuliacinėje talpykloje esančio vandens ir žemės grunto (5.13 pav.). Mėlyna ir oranžinė kreivė rodo atitinkamai šilumos perdavimo koeficientus, gautus taikant supaprastintą ANSYS 2D modelį. Pastebime, jog esant 16 metrų gyliui PIT šoninių šilumos nuostolių koeficientas yra apie $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Šilumos nuostolių koeficientas šiek tiek didėja, mažėjant gyliui. Esant 2 metrų gylyje šilumos nuostolio koeficientas yra apie $0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Jei paviršiaus plotas yra mažesniame nei 2 metrų gylyje, dėl aplinkos sąlygų įtakos šilumos nuostolių koeficientas gerokai padidėja. Apatinio PIT talpyklos paviršiaus – dugno šilumos nuostolio koeficientas yra $0,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



5.13 pav. Šilumos perdavimo koeficientas gruntui

Semiantis patirties iš įgyvendinto Danijos Marstal projekto buvo atlikta 4 skirtingų mėnesių grunto temperatūriniai pasiskirstymai [13]. Iš keturių tiriamųjų laikotarpių dirvožemio temperatūra yra didžiausia spalio mėnesį ir mažiausia vasarį, o tai parodo, jog yra daroma stipri įtaka dėl talpykloje esančio vandens ir aplinkos oro temperatūros skirtumų (5.14 pav.).

Iš kreivių matyti aiškus modelis: santykinai žemesnė grunto temperatūra talpyklos viršuje ir apačioje, tačiau temperatūra kyla apie 6 m žemiau žemės paviršiaus. Mažesnę temperatūrą talpyklos apačioje galima paaiškinti stipria šilumos stratifikacija. Dėl susidariusio terminio sluoksnio vandens sluoksnio temperatūra talpyklos dugne yra santykinai mažesnė, todėl esant 16 m žemiau žemės paviršiaus pastebima žemesnė temperatūra. Žemesnė grunto temperatūra prie žemės paviršiaus gali būti paaiškinta dėl dirvožemio aušinimo aplinkos oru žemesnėje temperatūroje.



5.14 pav. Grunto temperatūrinis pasiskirstymas

Remiantis šiomis nustatytomis vidutinėmis šilumos nuostolių vertėmis nuo šoninių paviršių priimame, kad projektuojamai PIT akumuliacinei talpyklai Kauno r. Akademijos miestelyje šoniniai šilumos nuostoliai į gruntą būtų apskaičiuojami:

$$Q_{\text{son.}} = U \cdot A \cdot (t_2 - t_1) \quad (13)$$

čia U – šilumos perdavimo koeficientas nuo šoninių paviršių gruntui, $W/m^2 \cdot K$; t_1 – grunto temperatūra, $^{\circ}C$; t_2 – talpykloje esančio vandens temperatūra, $^{\circ}C$; A – akumuliacinės talpyklos šoninio paviršiaus plotas iš keturių pusių, m^2 .

$$Q_{\text{son.}} = 0,15 \cdot 20000 \cdot (60 - 10) = 150 \text{ kW}$$

Taipogi apskaičiuojame akumuliacinės talpyklos apatinio dugno šilumos nuostolius:

$$Q_{\text{dugn.}} = U \cdot A \cdot (t_2 - t_1) \quad (14)$$

čia U – šilumos perdavimo koeficientas nuo dugno paviršiaus gruntui, $W/m^2 \cdot K$; t_1 – grunto temperatūra, $^{\circ}C$; t_2 – talpykloje esančio vandens temperatūra, $^{\circ}C$; A – akumuliacinės talpyklos šoninio paviršiaus plotas iš keturių pusių, m^2 .

$$Q_{\text{dugn.}} = 0,1 \cdot 2500 \cdot (30 - 10) = 5000W = 5kW$$

Bendri šilumos nuostoliai nuo PIT akumuliacinės talpyklos būtų:

$$Q_v = Q_{\text{virš.}} + Q_{\text{son.}} + Q_{\text{dugn.}} \quad (15)$$

čia $Q_{\text{virš.}}$ – saugyklos viršutiniai šilumos nuostoliai į aplinką, kW; $Q_{\text{son.}}$ – šoniniai šilumos nuostoliai į gruntą, kW; $Q_{\text{dugn.}}$ – apatinio dugno šilumos nuostoliai į gruntą, kW.

$$Q_v = 62,1 + 150 + 5 = 217,1 \text{ kW}$$

Per metus iš viso šilumos nuostolių būtų:

$$Q_v = 217,1 \text{ kW} \cdot 365 \cdot 24 = 1901796 \text{ kWh} = 1901,79 \text{ MWh} \quad (16)$$

6. Saulės akumuliacinės jėgainės ekonominiai skaičiavimai

Remiantis esamais įrengtais saulės kolektoriais centralizuotam šilumos tiekimui, galima apskaičiuoti apytikslius komponentų kaštus. Nustatant bendrąsias saulės energijos šildymo sistemos investicines išlaidas paprastai įvertinami tokie faktoriai [8]:

- Žemės ploto kaina;
- Saulės kolektorių kaina;
- Saulės kolektorių įrengimo kaina, įskaitant vamzdynų pajungimus kolektorių lauke;
- Kolektorių darbinio skysčio kaina;
- Šilumokaičio bloko kaina (įskaitant siurblius, išsiplėtimo indus, valdiklius);
- Prisijungimo prie esamos centralizuoto šildymo sistemos kaina;
- Kontrolės bei valdymo sistemos kaina;
- PIT akumuliacinės talpyklos įrengimo kaštai

6.1 Saulės kolektorių jėgainės integruotos su akumuliacine talpykla investicijų apskaičiavimas

6.1.1 Saulės kolektorių žemės ploto investicijų apskaičiavimas

Plokščiųjų saulės kolektorių žemės ploto investicijos būtų apskaičiuojamos [8]:

$$Pr_{zem.k.} = A_{zem.} \cdot Pr_{zem.} + D_{vamzd.} \cdot Pr_{vamzd.} \quad (17)$$

čia $A_{zem.}$ – saulės kolektorių lauko plotas, m^2 ; $Pr_{zem.}$ – žemės ploto kaina, Eur/m^2 ; $D_{vamzd.}$ – atstumas nuo saulės kolektoriaus lauko iki tinklo prijungimo taško, km ; $Pr_{vamzd.}$ – kaina už kilometrą, Eur/km .

$$Pr_{zem.k.} = 22500 \cdot 5 + 0,5 \cdot 210000 = 217500 \text{ Eur}$$

Projektuojamas saulės kolektorių laukas užima tokį plotą: $A_{zem.} = 22500 \text{ m}^2 = 225 \text{ a}$. Ringaudų seniūnijai priklausančio žemės sklypo 1a kaina vidutiniškai siekia 500 Eur. Todėl žemės sklypo kaina priimame, kad būtų 5 Eur/m^2 .

Atstumą nuo saulės kolektoriaus lauko iki tinklo prijungimo taško ($D_{vamzd.}$) priimame 0,5 km. Kaina už atstumą (km) nuo saulės kolektorių lauko iki tinklo prisijungimo taško būtų apskaičiuojama [8]:

$$Pr_{vamzd.} = 1400 \cdot \sqrt{A_{zem.}} \quad (18)$$

čia $A_{zem.}$ – saulės kolektorių lauko plotas, m^2 .

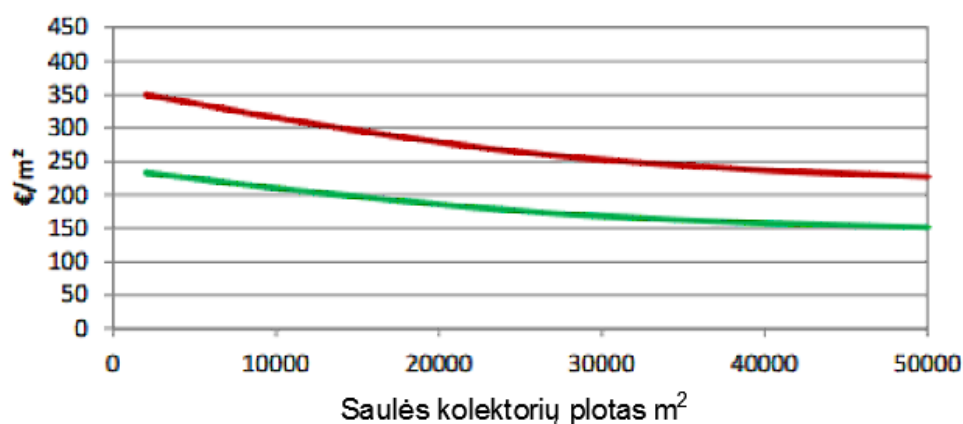
$$Pr_{vamzd.} = 1400 \cdot \sqrt{22500} = 210000 \text{ Eur/km}$$

6.1.2 Saulės kolektorių kainos apskaičiavimas

Priimame, kad pačio saulės kolektoriaus įrenginio vieneto kaina vidutiniškai siektų – 200 Eur. Kadangi saulės kolektorių yra 3660 vnt., tai bendra įrenginių investicinė kaina būtų $Pr_{saul.kol.} = 732000 \text{ Eur}$.

6.1.3 Saulės kolektorių lauko įrengimo investicijų apskaičiavimas

Saulės kolektorių įrengimo sąnaudas įskaitant lauko vamzdynų ir darbinio agento, šilumokaičių bloką sistemos ir jos įrengimo kainas vertiname pagal (6.1 pav.) pateiktas kreives [10]:



6.1 pav. Apytikslės saulės kolektorių lauko įrengimo sąnaudos Eur/m² įskaitant vamzdynus, šilumokaičių įrenginius, darbinį fluidą ir kitą reikalingą įrangą

Pagal šias pateiktas kreives, vidutiniškai galime priimti, kad įrengimo išlaidos būtų [10]:

$$Pr_{i\text{reng.}} = Pr_{i\text{r.vid.}} \cdot A_{SK} \quad (19)$$

čia $Pr_{i\text{r.vid.}}$ – priimta vidutinė saulės kolektorių įrengimo kaina, Eur/m²; A_{SK} – plokščiųjų saulės kolektorių plotas m².

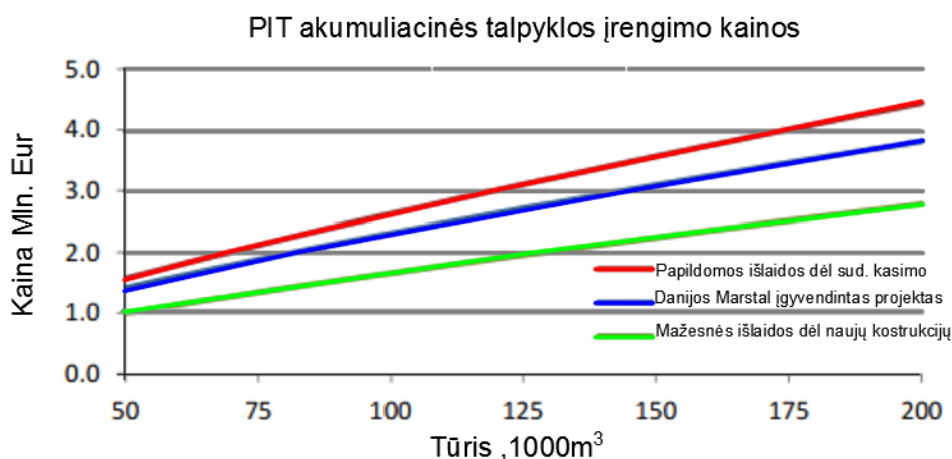
$$Pr_{i\text{reng.}} = 180 \cdot 22500 = 4.050.000 \text{ Eur}$$

6.1.4 Akumuliacinės talpyklos investicinių kaštų apskaičiavimas

Remiantis Danijos įgyvendintų projektų pavyzdžiais, PIT tipo akumuliacinės talpyklos įrengimo kaina svyruoja tarp 21 – 25 Eur už m³ [8]. Kadangi šiame tiriamajame projekte projektuojama 170000 m³ akumuliacinė talpykla, tai jos kaina būtų:

$$P_{PIT} = 21 \cdot 170000 = 3.570.000 \text{ Eur}$$

Naudodamiesi įgyvendintais panašaus tipo projektais Danijoje požeminių akumuliacinių talpyklų investicijų kainos parodomos skirtingomis kreivėmis (6.2 pav.). Mėlyna kreivė atspindi Marstal projekto Danijos patirtį. Raudona kreivė parodo papildomas išlaidas, įskaitant galimus papildomus kaštus, atsiradusius dėl sudėtingo grunto kasimo, prastų oro sąlygų. Žalioji kreivė parodo tikėtinas mažesnes išlaidas PIT akumuliacinėms talpykloms dėl atsirandančių plaukiojančio dangčio patobulinimų bei naujų technologijų pritaikymo požeminei saugyklai [8].



6.2 pav. Apytikslė PIT akumuliacinių talpyklų kaina pagal atitinkamą tūrį

6.1.5 Saulės jėgainės paleidimo – derinimo ir bendrųjų investicinių kaštų apskaičiavimas

Papildomai įvertiname planuojamos įrengti saulės kolektorių sistemos paleidimo ir derinimo kaštus:

$$Pr_{pal.der.} = 1,5\% \cdot (Pr_{saul.kol.} + Pr_{ireng.}) \quad (20)$$

čia $Pr_{saul.kol.}$ – plokščiųjų saulės kolektorių kaina, Eur; $Pr_{ireng.}$ – saulės kolektorių įrengimo sąnaudos, Eur.

$$Pr_{pal.der.} = 1,5\% \cdot (732000 + 4050000) = 71730 \text{ Eur}$$

Iš viso bendrų investicijų saulės kolektorių ir PIT talpyklos įrengimo sistemai būtų:

$$P_I = Pr_{zem.k.} + Pr_{saul.kol.} + Pr_{ireng.} + Pr_{pal.der.} + Pr_{PIT}. \quad (21)$$

čia $Pr_{zem.k.}$ – plokščiųjų saulės kolektorių žemės ploto investicijos, Eur; $Pr_{saul.kol.}$ – plokščiųjų saulės kolektorių kaina, Eur; $Pr_{ireng.}$ – saulės kolektorių įrengimo sąnaudos, Eur; $Pr_{pal.der.}$ – saulės kolektorių sistemos paleidimo ir derinimo sąnaudos, Eur; $Pr_{PIT.}$ – akumuliacinės talpyklos investiciniai kaštai, Eur.

$$P_I = 217500 + 732000 + 4050000 + 71730 + 3570000 = 8.641.230 \text{ Eur}$$

6.1 lentelė. Investicijų poreikio skaičiavimas

Investicijų poreikio skaičiavimas					
Eil. Nr.	Investicijų objektas	Mato vienetai	Kiekis	Kaina, Eur/vnt.	Suma, tūkst. Eur
1	Žemės ploto kaina	m ²	22500	5,0	217,5
2	Plokštieji saulės kolektoriai	vnt.	3660	200,0	732,0
3	Plokščiųjų saulės kolektorių įrengimas (įskaitant lauko vamzdinių, šilumokaičio blokų sistemų įrengimą kainas)	m ²	22500	180,0	4050,0
4	Paleidimo ir derinimo darbai, dokumentacija	vnt.	1	71,7	71,7
5	PIT akumuliacinė talpyklos įrengimas	m ³	170000	21,0	3570,0
6	Investicijos saulės kolektorių akumuliacinės sistemos įrengimui				8641,23

6.2 Šilumos energijos kainos ir investicijų atsiperkamumo nustatymas saulės jėgainėje

Projektuojama saulės kolektorių jėgainė yra viena iš šilumos tiekėjų, todėl gamina šilumą pilnu pajėgumu šildymo ir nešildymo sezono laikotarpiu. Ji gamintų energiją net 275 dienas per metus.

Šilumos energijos savikaina susideda iš:

- 1) Šilumos gamybos išlaidų (amortizacijos);
- 2) Banko paskolos ir aptarnavimo.

Kadangi saulės kolektorių jėgainė, įvertinus šilumos nuostolius yra 2,5MW galios, šildymo laikotarpis šiai jėgainei yra 275 dienos, todėl pagamintume 9980,4 MWh šilumos energijos per metus.

Saulės kolektorių šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKGI} = P_I \cdot 2,5\% \quad (22)$$

čia P_I – saulės kolektorių jėgainės investicijų kaina, Eur;

$$P_{SKGI} = 8.641.230 \cdot 2,5\% = 216030,75 \text{ Eur}$$

Šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKGIK} = \frac{P_{SKGI}}{Q_{SKm}} \quad (23)$$

čia P_{SKGI} – saulės kolektorių šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija, Eur; Q_{SKm} – saulės kolektorių jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$P_{SKGIK} = \frac{216030,75}{9980,4} = 21,65 \text{ Eur/MWh}$$

Banko išlaidų apskaičiavimas: Jos yra priklausomos nuo diskonto normos ir jėgainės gyvavimo laikotarpio. Priimame, kad saulės jėgainės gyvavimo laikotarpis yra 25 metai. Banko paskola priimame, kad sudaro 50% investicijų. Jei diskonto norma 5,33%, per metus bankui reiktų sumokėti tokia sumą:

$$B = P \cdot \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (24)$$

čia P – bankui mokama paskolos suma, sudaranti 50% investicijų, Eur; j – diskonto norma arba WACC; n – saulės kolektorių jėgainės gyvavimo laikotarpis, m.

$$B = 4320616 \cdot \frac{0,05(1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25} - 1} = 316775,5873 \text{ Eur}$$

Banko paskolos išlaidų dedamoji būtų apskaičiuojama:

$$BK = \frac{B}{Q_{SKm}} \quad (25)$$

čia B – bankui mokama kasmetinė pinigų suma, Eur; Q_{SKm} – saulės kolektorių jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$BK = \frac{316775,59}{9980,4} = 31,74 \text{ Eur/MWh}$$

Visa šilumos energijos gamybos savikaina būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKS} = P_{SKGIK} + BK \quad (26)$$

čia P_{SKGIK} – šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje, Eur/MWh; BK – banko paskolos išlaidų dedamoji, Eur/MWh.

$$P_{SKS} = 21,65 + 31,74 = 53,39 \text{ Eur/MWh}$$

Galutinė šilumos energijos pardavimo kaina būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKP} = P_{SKS} \cdot 5\% \quad (27)$$

čia P_{SKS} – šilumos energijos gamybos savikaina, Eur/MWh

$$P_{SKP} = 53,39 \cdot 1,05 = 56,05 \text{ Eur/MWh}$$

Skaiciuojant investicijų atsiperkamumą atsižvelgiame, kad investicijos būna keturių tipų: investicijos savomis lėšomis, investicijos savomis lėšomis ir paskola iš banko, investicijos savomis lėšomis ir fondų parama, investicijos savomis lėšomis kartu su paskola iš banko ir fondų parama.

Pirmuoju atveju apskaičiuosime investicijų atsipirkimo laikotarpį, investuojant savomis lėšomis. Investicijų atsipirkimo laikas būtų apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\text{Investicijų atsipirkimo laikas } (I_1) = \text{Investicijos (be paramos) / Pardavimo pelnas} \quad (28)$$

$$I_1 = \frac{8641230}{343325,82} = 25 \text{ m}$$

Pardavimo pajamos buvo apskaičiuotos naudojantis šia formule:

$$P_{SKPP} = P_{SKP} \cdot Q_{SKm} \quad (29)$$

čia P_{SKP} – šilumos energijos pardavimo kaina, Eur/MWh; Q_{SKm} – saulės kolektorių jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$P_{SKPP} = 56,05 \cdot 9980,4 = 559401,42 \text{ Eur}$$

6.2 lentelė. Projekto atsipirkimo laikas, be papildomų ES lėšų bei APVA fondų paramos

Eil. nr.	Ekonominiai rodikliai	Eur/metus
1	Pardavimo pajamos, Eur/metus	559401,4
2	Šilumos gamybos sąnaudos, Eur/Metus	216075,6
3	Pardavimo pelnas, Eur/metus	343325,8
4	Paprastasis investicijų atsipirkimo laikas, metai	25 metai

Jeigu būtų gaunamos papildomos lėšos 50% iš ES bei kitų fondų, skirtų atsinaujinančių energijos išteklių plėtrai, investicijų atsipirkimo laikas sutrumpėtų iki 10 metų:

Kuomet būtų gaunama parama 50% iš Europos Sąjungos bei APVA finansinių fondų saulės jėgainės bendrosios investicijos būtų:

$$P_{I2} = (Pr_{žem.k.} + Pr_{saul.kol.} + Pr_{įreng.} + Pr_{pal.der.} + Pr_{PIT.}) \cdot 50\% \quad (30)$$

čia $Pr_{žem.k.}$ – plokščiųjų saulės kolektorių žemės ploto investicijos, Eur; $Pr_{saul.kol.}$ – plokščiųjų saulės kolektorių kaina, Eur; $Pr_{įreng.}$ – saulės kolektorių įrengimo sąnaudos, Eur; $Pr_{pal.der.}$ – saulės kolektorių sistemos paleidimo ir derinimo sąnaudos, Eur; $Pr_{PIT.}$ – akumuliacinės talpyklos investiciniai kaštai, Eur.

$$P_{I2} = (217500 + 732000 + 4050000 + 71730 + 3570000) \cdot 50\% = 4.320.616 \text{ Eur}$$

Saulės kolektorių šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKGI} = P_{I2} \cdot 2,5\% \quad (31)$$

čia P_{I2} – saulės kolektorių jėgainės investicijų kaina su 50% parama, Eur;

$$P_{SKGI} = 4.320.616 \cdot 2,5\% = 108015,4 \text{ Eur}$$

Šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKGIK} = \frac{P_{SKGI}}{Q_{SKm}} \quad (32)$$

čia P_{SKGI} – saulės kolektorių šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija, Eur; Q_{SKm} – saulės kolektorių jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$P_{SKGIK} = \frac{108015,4}{9980,4} = 10,82 \text{ Eur/MWh}$$

Banko išlaidų apskaičiavimas: Jos yra priklausomos nuo diskonto normos ir jėgainės gyvavimo laikotarpio. Priimame, kad saulės jėgainės gyvavimo laikotarpis yra 25 metai. Banko paskola priimame, kad sudaro 50% investicijų. Jei diskonto norma 5,33%, per metus bankui reiktų sumokėti tokia suma:

$$B = P \cdot \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (33)$$

čia P – bankui mokama paskolos suma, sudaranti 50% investicijų, Eur; j – diskonto norma arba WACC; n – saulės kolektorių jėgainės gyvavimo laikotarpis, m.

$$B = 2592369,6 \cdot \frac{0,053(1 + 0,053)^{25}}{(1 + 0,053)^{25} - 1} = 158387,79 \text{ Eur}$$

Banko paskolos išlaidų dedamoji būtų apskaičiuojama:

$$BK = \frac{B}{Q_{SKm}} \quad (34)$$

čia B – bankui mokama kasmetinė pinigų suma, Eur; Q_{SKm} – saulės kolektorių jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$BK = \frac{158387,79}{9980,4} = 15,87 \text{ Eur/MWh}$$

Viso neskaitant pelno šilumos energijos gamybos savikaina būtų:

$$P_{SKS} = P_{SKGIK} + BK \quad (35)$$

čia P_{SKGIK} – šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje, Eur/MWh; BK – banko paskolos išlaidų dedamoji, Eur/MWh.

$$P_{SKS} = 10,82 + 15,87 = 26,69 \text{ Eur/MWh}$$

Galutinė šilumos energijos pardavimo kaina būtų apskaičiuojama:

$$P_{SKP} = P_{SKS} \cdot 20\% \quad (36)$$

čia P_{SKS} – šilumos energijos gamybos savikaina, Eur/MWh

$$P_{SKP} = 26,69 \cdot 1,2 = 32,03 \text{ Eur/MWh}$$

6.3 lentelė. Projekto atsipirkimo laikas, be papildomų ES lėšų bei APVA fondų paramos

Eil. nr.	Ekonominiai rodikliai	Eur/metus
1	Pardavimo pajamos, EUR/metus	319652,3
2	Šilumos gamybos sąnaudos, Eur/Metus	107987,9
3	Pardavimo pelnas, EUR/metus	211664,4
4	Paprastasis investicijų atsipirkimo laikas	10 metų

Investicijų atsipirkimo laikotarpis apskaičiuojamas priimant, kad pusę turimų investicijų (50%) finansuoja ES bei APVA fondai, o likusios investicijos yra 50% padengiamos savomis lėšomis, paskola iš banko sudaro 50% likusiųjų investicijų. Investicijų atsipirkimo laikas būtų apskaičiuojama šia formule:

$$\text{Investicijų atsipirkimo laikas } (I_1) = \text{Investicijos (be paskolos) / Pardavimo pelnas} \quad (37)$$

$$I_3 = \frac{2160308}{211664,4} = 10,2 \text{ m}$$

Pateikiame apskaičiuotų ekonominių – energetinių rodiklių lentelę, kurioje parodome galutines nustatytas reikšmes:

6.4 lentelė. Ekonominių – energetinių rodiklių nustatymas

Ekonominių – energetinių rodiklių nustatymas	
Šiluminė galia, MW	2,5
Darbo valandų skaičius per metus	4000
Parduotos šilumos kiekis per metus, MWh	9980
Pajamos už šilumą, € (32€/MWh)	319652,3
Saulės kolektorių kiekis, m ²	22500
Pagaminamos šilumos kiekis, MWh (0,533MWh/m ² /metus)	12002
Pagaminamos šilumos kiekis, MWh įvertinus nuostolius	9980
Vieno kvadratinio metro kaina, perkant didelį kiekį, €	180
Kolektorių kaina, M€	4999500
Paleidimo ir derinimo kaštai, M€	71730
Akumuliacinės talpyklos kaina, €	3570000
Kolektorių tarnavimo laikas, metais	25
Paramos dydis, %	50
Paskola, €	2160308
Kasmetinė įmoka bankui (5,33% diskonto norma),€	158388
Šilumos gamybos sąnaudos,€	107988
Pardavimo pelnas, €	211664,4
Šilumos pardavimo kaina, Eur/MWh	32,03
Investicijų atsipirkimas su 50% parama, m	10

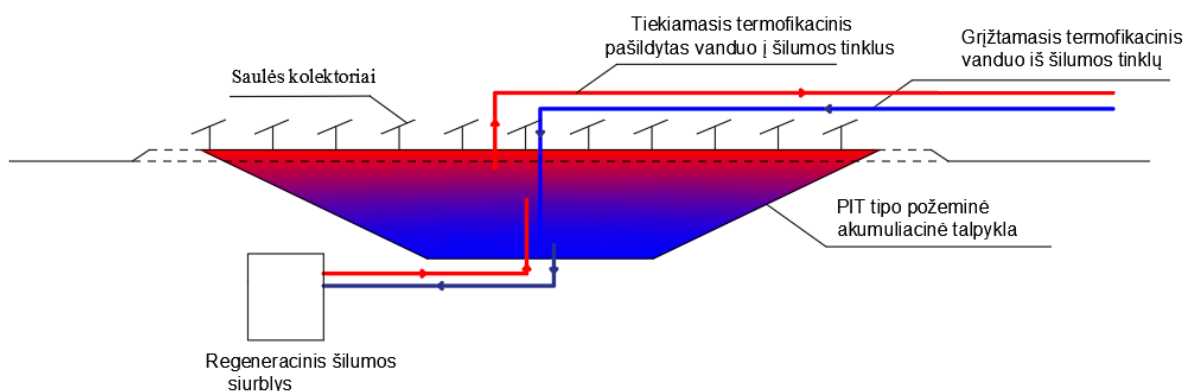
Išvada: Matome, kad šilumos pardavimo į žema–temperatūrinius tinklus kaina ženkliai sumažėtų 1,8 ct už kWh, lyginant su dabartine energijos kaina pagaminama iš biokuro, kurios kaina yra apie 5 ct už kWh. Pastebime, kad pelnas nėra didelis, todėl, kad saulės kolektorių jėgainės pradinės investicijos yra didelės, viršija 8mln. Eur. Gavus finansavimą iš ES bei kitų finansinių fondų, saulės kolektorių jėgainės projekto atsipirkimo laikotarpis sutrumpėtų iki 10 metų, o šilumos energijos pardavimo kaina būtų apie 32 Eur/MWh. Saulės kolektorių jėgainės yra konkurencingos pagal šiandienines kainas. Pagal dabartines elektros ir šilumos energijos gamybos kainas, taipogi įvertinus biokuro išteklių kainų didėjimą, saulės jėgainės projektas yra ekonomiškai pagrįstas.

7. Šilumos siurblio integravimas didelio tūrio požeminėje akumuliacinėje talpykloje

Šioje projektuojamoje požeminėje akumuliacinėje talpykloje gruodžio – sausio – vasario mėnesiais bus naudojamas pramoninis šilumos siurblys. Pasirinkta sistema – akumuliacinė karšto vandens talpykla, kurioje vandens temperatūra yra apie 70 laipsnių, todėl pagal anksčiau darytą analizę iš saulės energijos sukaupta šilumos energija akumuliacinėje talpykloje išsilaikytų iki lapkričio mėnesio galo. Todėl tolimesniam energijos generavimui pasirenkamas regeneracinis pramoninis šilumos siurblys naudojantis amoniaką, kaip darbo agentą. Jis užtikrintų energijos poreikį gruodžio – vasario mėnesiais, kas sudarytų vidutiniškai 91 dieną.

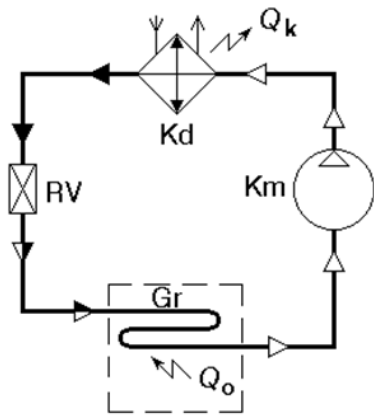
7.1 Šilumos siurblio veikimo principas

Šilumos siurblys dirbtų imdamas šilumą iš akumuliacinės talpyklos apatinio sluoksnio ir gražindamas taip pat į žemutinį sluoksnį. Šis įrenginys veiktų dalinai regeneruojant paaimamą šilumą apie 30 °C nuo rezervuaro dugno ir gražindamas pašildytą vandenį iki ~ 70 °C. Tokiu būdu būtų pašildomas PIT akumuliacinėje talpykloje esantis šilumnešis – vanduo. Pašildytas iki 70 °C vanduo būtų tiekiamas į žema–temperatūrinį tinklą, iš kurio termofikaciniu vandeniu būtų aprūpinami naujos statybos daugiabučiai (7.1 pav.).



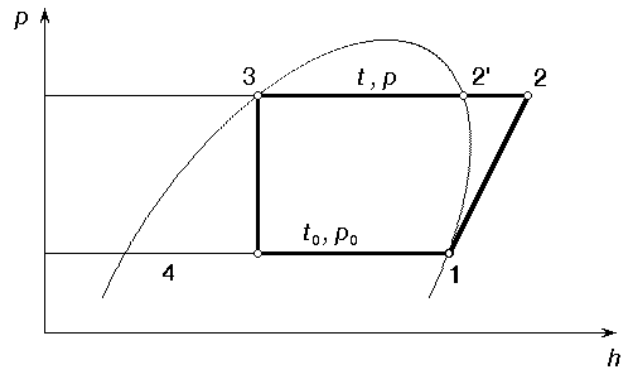
7.1 pav. Šilumos siurblio integracija į akumuliacinę talpyklą

Uždara termodinaminė sistema šiame šilumos transformatoriuje išvedama iš pusiausvyros kompresoriumi. Juo suslegiami amoniako NH_3 agento garai iki slėgio, kuriam esant agentas kondensuojasi prie aukštesnės temperatūros nei už temperatūrą aplinkos, į kurią norime nuvesti kondensacijos šilumą. Šiuo atveju aplinka yra akumuliacinė vandens talpykla, kondensacijos temperatūra priimama 75 °C (su slėgiu 37bar), kuri yra aukštesnė už temperatūrą, kurią norime palaikyti akumuliacinėje saugykloje (70 °C). Po to darbo agentas droseliuojamas iki slėgio 10,6 bar, kuriam esant agento virimo temperatūra turi būti žemesnė už temperatūrą tos aplinkos, iš kurios norime paimti šilumą (30 °C). Todėl virimo temperatūrą priimame 28 °C. Pavaizduojame pagrindinius pramoninio šilumos siurblio komponentus bei p-h diagramą (7.3 pav.), kurios principu veikia įrenginys (7.2 pav.).



7.2 pav. Garinė kompresorinė šilumos siurblio sistema

Km - kompresorius;
 Kd - kondensatorius;
 RV - reguliavimo ventilis;
 Gr – garintuvas.



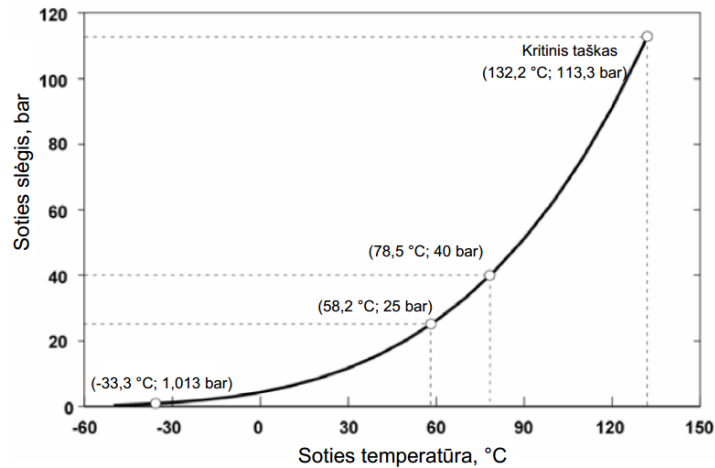
7.3 pav. Šilumos siurblio p-h diagrama

4 – 1 virimas (garavimas);
 1 – 2 suslėgimas kompresoriuje;
 2 – 3 kondensacija;
 3 – 4 droseliacija.

7.2 Amoniakinių pramoninių šilumos siurblių sistemos

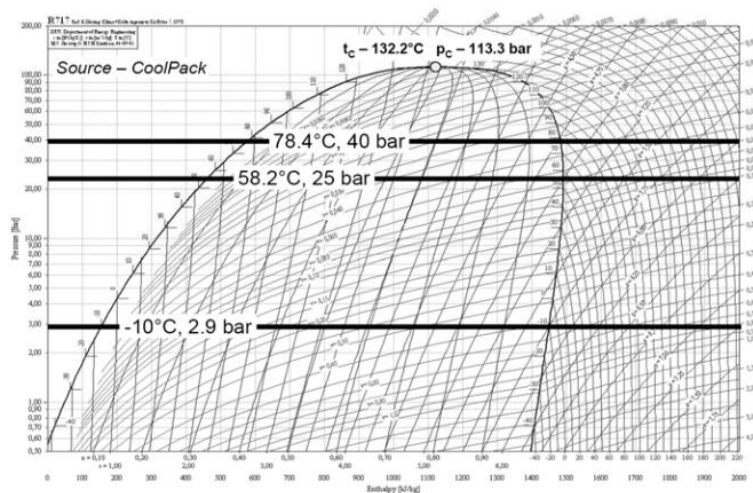
Amoniakas (NH₃, R717) yra pati geriausia alternatyva natūraliems darbiniais agentams, nes jis jau daugelį metų yra plačiai naudojamas pramoniniuose šilumos siurbliuose. Pramoninėms reikmėms šildymui ir aušinimui skirti amoniakiniai šiluminiai siurbliai užtikrina aukštą energijos vartojimo efektyvumą dėl palankių termofizinių skysčių savybių. Tačiau amoniakas yra toksiškas skystis, o griežti amoniako šaldymo ir šilumos siurblių sistemų statybos ir eksploataavimo standartai ir taisyklės trukdė jo naudojimui daugelyje šalių. Amoniakas yra aplinkai palankus darbinis skystis su nuliniu ODP – ozono ardymo potencialu ir nuliniu GWP – visuotiniu atšilimo potencialu [15].

Garavimo ir kondensacijos metu soties temperatūra ir slėgis yra svarbios savybės, kai pasirenkamas darbinis skystis tam tikram šilumos siurblio ciklui. Amoniako sočiųjų garų slėgio kreivė parodyta (7.4 pav.). Dėl santykinai žemos amoniako virimo temperatūros -33,3 °C ir didelės kritinės temperatūros $T_c = 132,2^{\circ}\text{C}$, amoniakas apima platų šilumos siurblių spektrą nuo šaldymo sistemų iki pramoninių šilumos siurblių sistemų [15].



7.4 pav. Amoniako sočiųjų garų slėgio kreivė

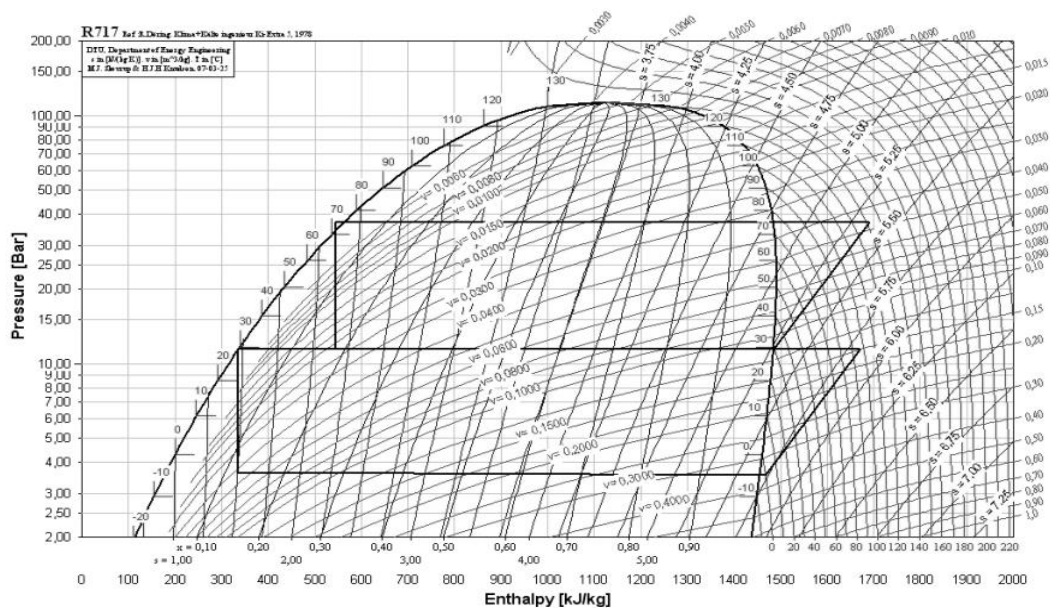
Pavaizduojame amoniako logaritminę p-h diagramą su kondensacijos temperatūromis esant 2,9; 25 ir 40 bar darbiniam slėgiui (7.5 pav.). Prie šių skirtingų darbinių slėgių parenkamos vienos pakopos ar dviejų pakopų šilumos siurblių sistemos, iš kurių kiekviena sistema turi savų privalumų ir trūkumų.



7.5 pav. Amoniako Log p-h diagrama esant skirtingoms kondensacijos temperatūroms

Pagrindinis trūkumas, susijęs su vienos pakopos amoniako šilumos siurbliais – ribota pašildyto vandens temperatūra iš kondensatoriaus apie 48-52 ° C, kai naudojama standartinė 25 barų kompresorinė įranga [15].

Naudojant dviejų pakopų sistemos konstrukciją su 40 barų kompresoriumi ir kondensatoriumi, antriniu etapu, maksimali vandens temperatūra galėtų būti padidinama iki maždaug 68 ° C [15]. Dviejų pakopų darbo režimas paprastai padidina efektyvumą iki 20 – 40%, tačiau išlaidos yra 80 – 100% didesnės nei vienos pakopos sistemos. Ekonomiškiau yra naudoti vienos pakopos šilumos siurblio sistemą su 40 barų kompresoriumi ir kondensatoriumi, kur šiam atvejui papildomos išlaidos būtų apie 15 – 25% didesnės nei naudojant paprastąją sistemą pritaikytą dirbti prie 25bar [15]. 7.6 paveikslėlyje parodome dviejų pakopų amoniako šilumos siurblio ciklą su pilnu tarpiniu aušinimu tarpiniame slėgyje. Garavimo ir kondensacijos temperatūra atitinkamai yra -5 ° C ir 75 ° C, o izentropinis kompresoriaus efektyvumas yra 75% [15].



7.6 pav. Dviejų pakopų amoniako šilumos siurblio ciklas

7.3 Šilumos siurblių energijos efektyvumas naudojant amoniaką

Amoniakinį darbo agentą naudojančios šilumos siurbliai pasiekia didesnę našumo koeficientą (COP) nei R407C ir R134a darbo agentai vienodomis eksploataavimo sąlygomis. Pavyzdys – teoriniam vienos pakopos šilumos siurblio ciklui, veikiančiam su $-5\text{ }^{\circ}\text{C} / 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ garavimo / kondensacijos temperatūra, izentropiniu ir adiabatiniu suspaudimu be perkaitimo ar peraušinimo procesų, amoniako ciklo COP yra apie 7% ir 11% didesnis nei R134a ir R407C ciklų. Skirtumai būtų dar didesni realiose sistemose dėl palankių amoniako termofizinių savybių [17].

7.4 Regeneracinio vienpakopio šilumos siurblio ciklo be peraušinimo ir su peraušinimu analizė

PIT akumuliacinei talpyklai pasirenkame vienpakopį pramoninį šilumos siurblių. Atliksime ciklo su peraušinimu ir be jo palyginamąją analizę. Paskaičiuosime kokį ciklo efektyvumo prieaugį duoda papildomas kondensato peraušinimas siurbiamais iš garintuvo garais.

Analizuojamoje situacijoje nagrinėjame darbo agentą R717. Priimame, kad jo kondensacijos temperatūra yra $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, o virimo $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kai nėra peraušinimo, naudojantis „CoolPack“ programa turime tokius ciklo taškų technologinius parametrus (7.1 lentelė):

7.1 lentelė. Šaldymo agento R717 reikalingi grafiko taškai, skaičiavimams atlikti

Ciklo taško Nr.	Temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Slėgis, bar	Entalpija, kJ/kg	Entropija, kJ/kg K	Savitasis tūris, m^3/kg
1	28	10,99	1484,03	5,28	0,1174
2	123	37,08	1662,9	5,28	0,0448
2'	123	37,08	1662,9	5,28	0,0448
3	75	37,08	562,17	-	-
4	28	10,99	562,17	-	-

Analizuojamos entalpijų reikšmės apskaičiuotos „Coolpack“ programa (7.7 pav.):

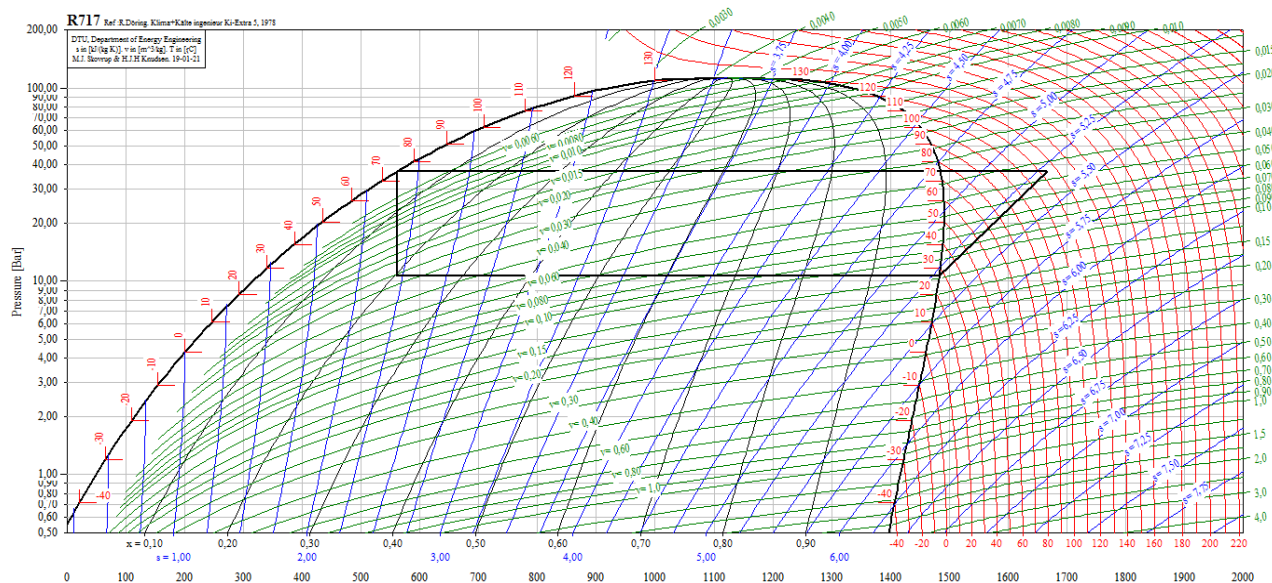
$$h_1 = 1484,03 \text{ kJ/kg}; h_2 = 1662,9 \text{ kJ/kg}; h_3 = h_4 = 562,17 \text{ kJ/kg}.$$

Tuomet šilumos transformacijos koeficientas būtų apskaičiuojamas:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (38)$$

čia h_1 – pradinio taško (NH₃ agento garų) suslėgimo proceso kompresoriuje entalpija, kJ/kg; h_2 – galinio taško (NH₃ agento garų) suslėgimo proceso kompresoriuje entalpija, kJ/kg; h_3 – amoniako (NH₃) agento garų kondensacijos proceso pabaigos entalpija, kJ/kg.

$$COP = \frac{1662,9 - 562,17}{1662,9 - 1484,03} = 6,15$$



7.7 pav. Regeneracinio šilumos siurblio ciklas be pėraušinimo

Iš apskaičiuotų rezultatų matome, kad šilumos transformacijos koeficientas yra ganėtinai aukštas, kadangi darbinio agento NH₃ garavimo ir kondensacijos procesų temperatūros yra tinkamose technologinio ciklo sąlygose.

Kai turime skysčio pėraušinimą siurbiamais iš garintuvo garais, turime žinoti vieną iš dviejų dydžių: arba siurbiamų garų perkaitinimą šilumokaityje, arba skysčio pėraušinimą. Šiuo atveju analizuojame ciklo taškų technologinius parametrus, kuomet vyksta darbo agento – amoniako pėraušinimas (7.2 lentelė):

7.2 lentelė. Šaldymo agento R717 reikalingi grafiko taškai, skaičiavimams atlikti

Ciklo taško Nr.	Temperatūra, °C	Slėgis, bar	Entalpija, kJ/kg	Entropija, kJ/kg K	Savitasis tūris, m ³ /kg
1	28	10,99	1484,03	5,28	0,117
2	123	37,08	1662,9	5,28	0,0448
2'	123	37,08	1662,9	5,28	0,0448
3	60	37,08	484,43	-	-
4	28	10,99	484,43	-	-

Analizuojamos entalpijų reikšmės apskaičiuotos „Coolpack“ programa: $h_1 = 1484,03$ kJ/kg; $h_1' = 1484,03$ kJ/kg; $h_2 = 1662,9$ kJ/kg; $h_2' = 1662,9$ kJ/kg; $h_3 = 484,43$ kJ/kg; $h_3' = 562,17$ kJ/kg; $h_3 = h_4 = 484,43$ kJ/kg;

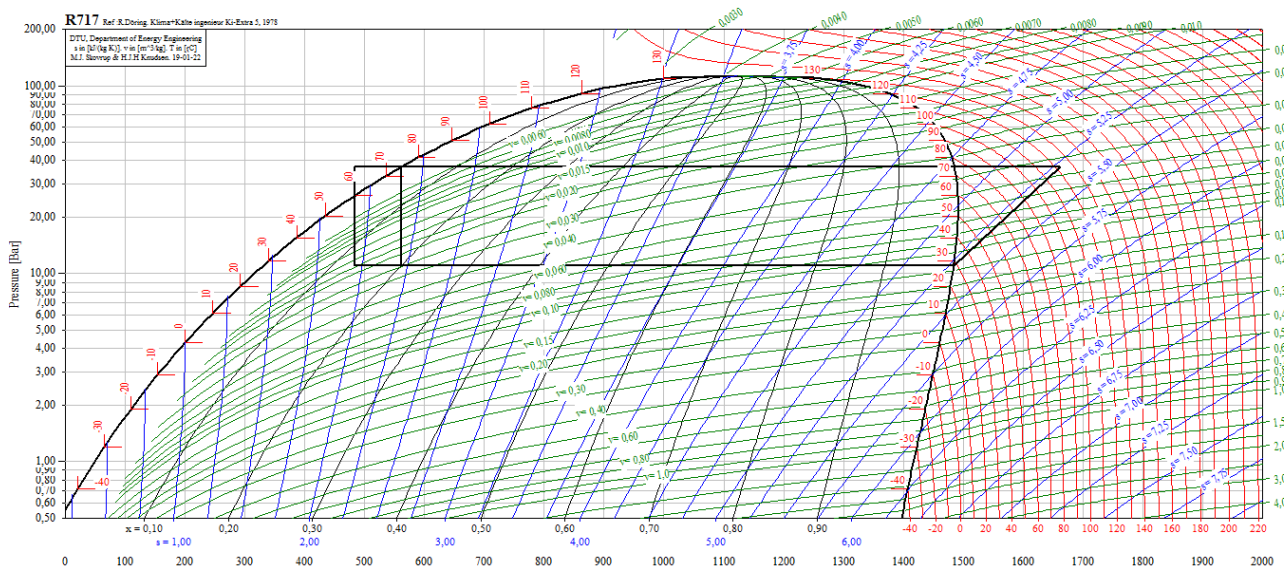
Tuomet šilumos transformacijos koeficientas būtų apskaičiuojamas:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (38)$$

čia h_1 – pradinio taško (NH₃ agento garų) suslėgimo proceso kompresoriuje entalpija, kJ/kg; h_2 – galinio taško (NH₃ agento garų) suslėgimo proceso kompresoriuje entalpija, kJ/kg; h_3 – amoniako (NH₃) darbinio agento – peraušinto skysčio kondensacijos proceso pabaigos entalpija, kJ/kg.

$$COP = \frac{1662,9 - 484,43}{1662,9 - 1484,03} = 6,59$$

Pastebime, kad šilumos transformacijos koeficientas (COP) padidėja 7 proc. Šis papildomas kondensato peraušinimas siurbiamais iš garintuvo garais leidžia efektyviau pagaminti šilumos energiją (7.8 pav.).



7.8 pav. Regeneracinio šilumos siurblio ciklas su peraušinimu

7.5 Pramoninio šilumos siurblio parinkimas ir technologinė analizė

Parenkame „vanduo – vanduo“ tipo pramoninį šilumos siurblių „Neatpump“ skirtą karšto vandens šildymui pramoninėms didelės galios sistemoms. Vienos pakopos „Neatpump“ pramoniniai siurbliai yra prieinami tiek atviro, tiek uždarojo ciklo vandens šildymo sistemoms. Šio tipo vienos pakopos šilumos siurbliai turi galimybę pašildyti vandenį iki 80 ° C. Pajėgumai svyruoja nuo 380 kW iki 2600 kW . Galimi iki 2 MW galios dviejų pakopų šilumos siurblių sprendimai, kurie gali pasiekti net iki 90 ° C temperatūrą, tačiau šių tipų sistemos yra ne itin ekonomiškai parankios (7.9 pav.) [21].

Parenkame 1 MW galios pramoninį regeneracinį šilumos siurblių. Per metus iš šio siurblio būtų pagaminama šiluminės energijos:

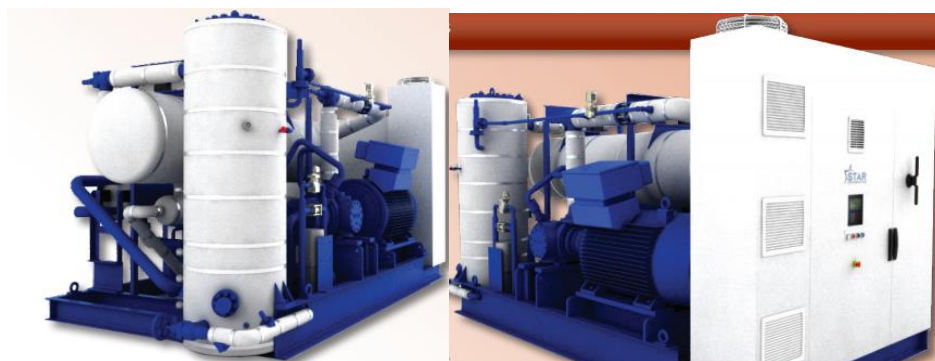
$$P = 1MW \cdot 91dienes \cdot 24h = 2184 MWh$$

Šio įrenginio efektyvumas būtų gerinamas papildomai peraušinant, todėl šilumos siurblio šilumos transformavimo koeficientas būtų 6,59, pagal anksčiau darytą analizę. Išsamesnė parenkamo šilumos siurblio techninė charakteristika pateikiama 7.3 lentelėje:

7.3 lentelė. Šilumos siurblio techninė charakteristika

Šilumos siurblio techninė charakteristika	
Įrenginio modelis:	„Neatpump“
Gamintojas:	Star renewable energy, UK
Tipas:	Šilumos siurbliai vanduo/vanduo
Elektros naudojama galia, kW	144
Šiluminė galia, kW	1000
Efetyvumo koeficientas COP	6,59
Vardinė šiluminė galia, kW	1315
Galia 1 pakopos, kW	1000
Šaldymo agentas	R717

Šilumos siurblys dirbtų imdamas šilumą iš talpyklos apatinio sluoksnio ir grąžintų taip pat į žemutinį sluoksnį. Šis įrenginys veiktų dalinai regeneruojant paimamą šilumą nuo rezervuaro dugno. Tokiu būdu būtų pašildomas PIT akumuliacinėje talpykloje esantis šilumnešis - vanduo. Pašildytas iki 70°C vanduo iš talpyklos būtų tiekiamas į žema – temperatūrinį tinklą, iš kurio termofikaciniu vandeniu būtų aprūpinami šilumos vartotojai – naujos statybos daugiabučiai.



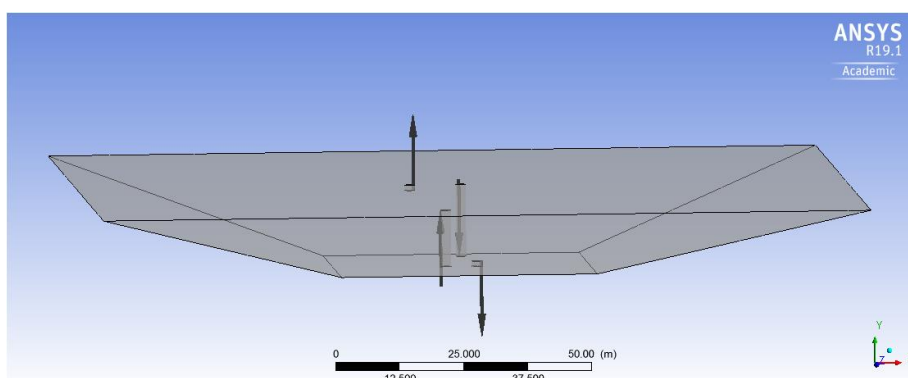
7.9 pav. „Neatpump“ pramoninis šilumos siurblys

7.5.1. Pramoninio šilumos siurblio aplinkosauginė nauda

„Neatpump“ šilumos siurbliai naudoja darbo agentą – amoniaką, natūraliai veikiančią medžiagą, pasižyminčią išskirtiniu efektyvumu šilumos siurblio darbui. Anglies dioksido emisija kg CO₂ per kW šildymui, skirta „Neatpump“, yra gerokai mažesnė palyginus su tradiciniais šilumos siurblių metodais. Amoniako naudojimas šiame pramoniniame siurblyje nesukelia globalinio atšilimo efekto, jis yra aplinkai palankus darbinis skystis su nuliniu ODP (Ozone depletion potential) ir nuliniu GWP (Global Warming Potential).

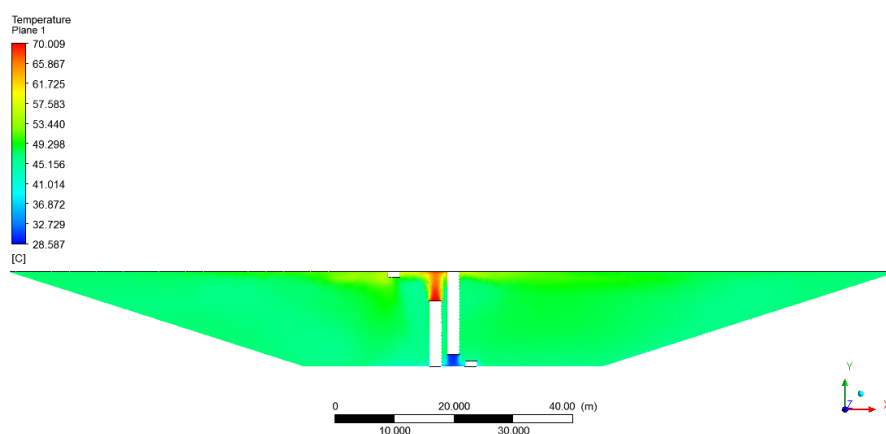
7.6 Akumuliacinės talpyklos integruotos su šilumos siurbliu modeliavimas

Naudojantis „ANSYS“ energijos modeliavimo programiniu paketu buvo sumodeliuota PIT tipo akumuliacinės talpyklos integracija su pramoniniu šilumos siurbliu. Joje pavaizduojami pagrindiniai šilumos siurblio energijos srautai: pašildyto vandens atvamzdis iš šilumos siurblio (70°C) bei apatinėje dalyje esantis kitas atvamzdis, žymintis grįžtantį šaltesnį (~30°C) vandens srautą į šilumos siurblių. Taipogi šioje talpykloje pavaizduojami du pagrindiniai termofikacinio vandens atvamzdžiai: viršutinis – rodantis pašildyto iki ~70°C vandens tiekimą į žema-temperatūrinius tinklus, o kitas – grįžtantis atvamzdis iš žema-temperatūrinių tinklų ~30-35 °C, kurio vandens srautas išleidžiamas apatinėje talpyklos dalyje. Šiuos energijos srautus vaizduojame (7.10 pav.).



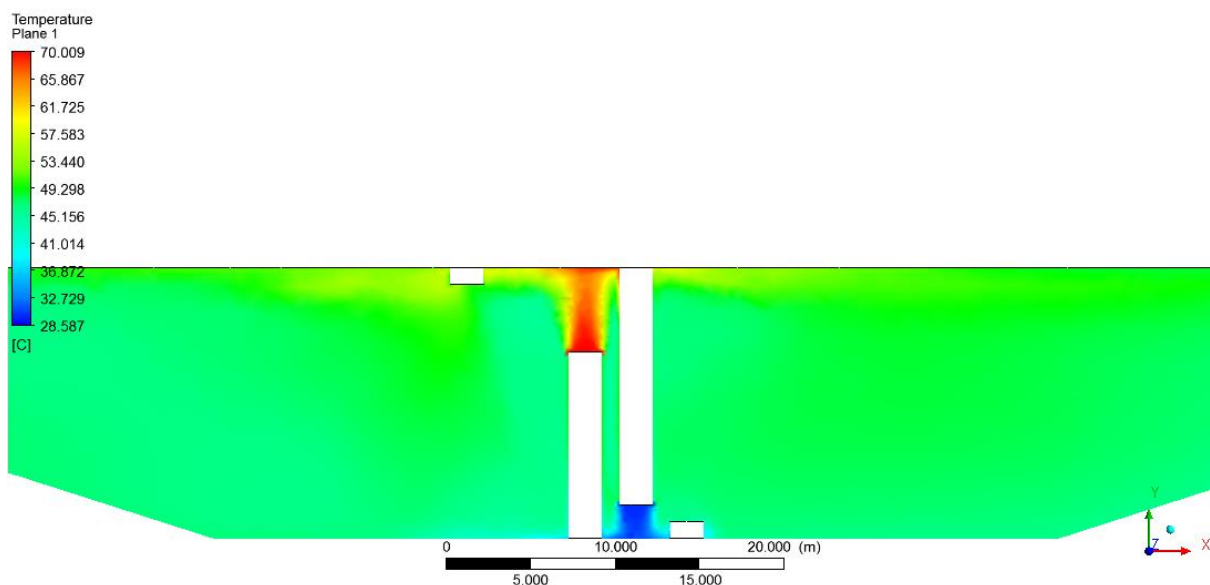
7.10 pav. PIT akumuliacinės talpyklos energijos srautai integravus šilumos siurblių

Atliekant energijos virsmų talpykloje analizę buvo gauti temperatūrinio pasiskirstymo rezultatai, kurie parodė, kad vykstant energijos mainams, šilti ir šalti srautai maišosi ir sudaro difuzinio judėjimo vaizdą, kuris trikdo tobulo stratifikacijos susidarymui (7.11 pav.).



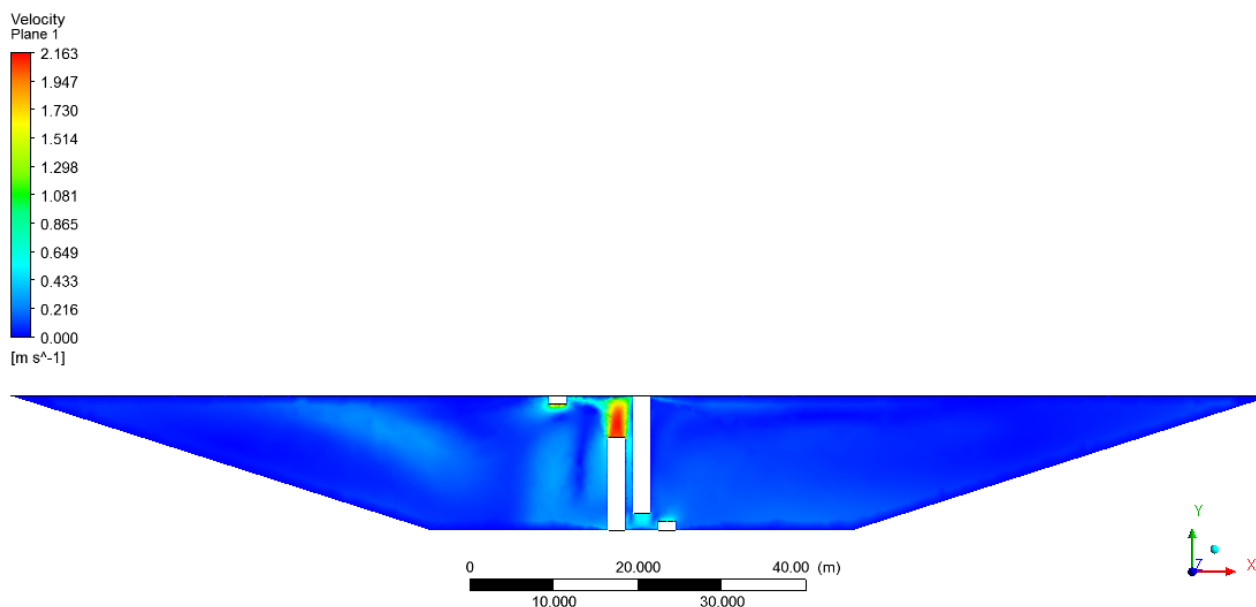
7.11 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas

Pastebime, kad talpyklos apačioje, ties išpurškimo vietomis susiformuoja žemesnės temperatūros sluoksniai 30 – 40 °C. Talpyklos viduriniuose sluoksniuose vandens temperatūra aukštėja ir tampa artima 50 – 60 °C. Saugyklos viršuje pastebima, kad iš grįžtančio šilumos siurblio pašildyto vandens susiformuoja aukštesnių temperatūrų sluoksnis, kuris siekia 65 – 70 °C temperatūrą (7.12 pav.).



7.12 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio temperatūrinis pasiskirstymas

Taipogi gauti greičių pasiskirstymo akumuliacinėje talpykloje rezultatai, kurie rodo, kad vandens srautų greitis yra didžiausias ties vandens išpurškimo vietomis, esantis prie atvamzdžių ribų, kur siekia iki 1,5 – 2m/s. Pastebime, kad talpyklos viduje vyksta taipogi vandens judėjimas vidutiniškai apie 0,1 – 0,2 m/s, kuris sukelia difuzinį įspūdį (7.13 pav.).



7.13 pav. PIT akumuliacinės talpyklos pjūvio greičių pasiskirstymas

8. Šilumos siurblio jėgainės energetinė – ekonominė analizė

Projektuojama šilumos siurblio jėgainė gamina šilumą pilnu pajėgumu šildymo sezono laikotarpiu. Ji užtikrintų energijos poreikį gruodžio – vasario mėnesiais, kas sudarytų vidutiniškai 91 dieną.

Šilumos siurblio jėgainei šilumos energijos savikaina susidėtų iš:

- Elektros energijos kainos;
- Šilumos gamybos išlaidų;
- Banko paskolos ir aptarnavimo.

Kadangi šilumos siurblio jėgainė yra parenkama 1 MW galios, per šildymo sezoną vidutiniškai dirbtų 95% pajėgumu. Todėl jėgainės šiluminė galia būtų apskaičiuojama:

$$P_G = P_1 \cdot 95\% \quad (39)$$

čia P_1 – parenkama šilumos siurblio galia, MW.

$$P_G = 1 \cdot 95\% = 0,95 \text{ MW}$$

Šildymo laikotarpis šiai jėgainei 91 diena, todėl būtų pagaminama energijos:

$$Q = P_G \cdot 91d \cdot 24h \quad (40)$$

$$Q = 0,95 \cdot 91 \cdot 24 = 2074,8 \text{ MWh}$$

Šilumos siurbliui reikalinga elektros energijos galia būtų suvartojama:

$$W_e = \frac{P_G}{COP} \quad (41)$$

čia P_G – šilumos siurblio jėgainės galia, MW; COP – šilumos transformavimo koeficientas.

$$W_e = \frac{0,95}{6,59} = 0,144 \text{ MW}$$

Per 91 dieną elektros energijos būtų suvartojama – 314,49 MWh

Apskaičiuojame elektros energijos dedamąją. Ji paprastai priklauso nuo perkamos iš biržos elektros energijos kainos. Priimame, kad stambiam vartotojui elektros energija tiekiamą tiesiai iš perdavimo tinklų, neįskaičiuojant žemos įtampos skirstomųjų tinklų kainos, todėl perkama elektros energijos kaina priimama vidutinė – 85 Eur/MWh.

Elektros energijos kainos dedamoji šilumos gamybos savikainoje būtų apskaičiuojama:

$$P_{el.k.} = \frac{P_{el}}{COP} \quad (42)$$

čia P_{el} – vidutinė perkama elektros energijos kaina, Eur/MWh; COP – šilumos transformavimo koeficientas.

$$P_{el.k.} = \frac{85}{6,59} = 12,89 \text{ Eur/MWh}$$

Šilumos siurblio jėgainės investicijos būtų apskaičiuojamos:

$$P_{I\dot{S}S} = P_G \cdot 450 \quad (43)$$

čia P_G – šilumos siurblio jėgainės galia, MW;

$$P_{I\dot{S}S} = 950 \text{ kW} \cdot 450 = 427500 \text{ Eur}$$

Taipogi yra įvertinamos šilumos siurblio šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija:

$$P_{GI} = P_{I\dot{S}S} \cdot 2,5\% \quad (44)$$

čia $P_{I\dot{S}S}$ – šilumos siurblio jėgainės investicijos, Eur.

$$P_{GI} = 427500 \cdot 2,5\% = 10687,5 \text{ Eur}$$

Šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji šilumos savikainoje būtų apskaičiuojama:

$$P_{GIK} = \frac{P_{GI}}{Q} \quad (45)$$

čia P_{GI} – šilumos siurblio šilumos gamybos išlaidos ir amortizacija, Eur; Q – šilumos siurblio pagaminama energija, MWh

$$P_{GIK} = \frac{10687,5}{2074,8} = 5,15 \text{ Eur/MWh}$$

Banko išlaidų apskaičiavimas: Jos yra priklausomos nuo diskonto normos ir jėgainės gyvavimo laikotarpio. Priimame, kad šilumos siurblio gyvavimo laikotarpis yra 30 metų. Jei diskonto norma 5,33%, per metus bankui reiktų sumokėti tokia suma:

$$B = P \cdot \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (46)$$

čia P – bankui mokama paskolos suma, Eur; j – diskonto norma arba WACC; n – šilumos siurblio jėgainės gyvavimo laikotarpis, m.

$$B = 427500 \cdot \frac{0,05(1+0,05)^{30}}{(1+0,05)^{30} - 1} = 27077,18 \text{ Eur}$$

Banko paskolos išlaidų dedamoji būtų apskaičiuojama:

$$BK = \frac{B}{Q} \quad (47)$$

čia B – bankui mokama kasmetinė pinigų suma, Eur; Q – šilumos siurblio jėgainės metinė šilumos energijos gamyba, MWh.

$$BK = \frac{27077,18}{2074,8} = 13,05 \text{ Eur/MWh}$$

Visa šilumos siurblio jėgainės šilumos energijos gamybos savikaina būtų apskaičiuojama:

$$P_{\text{\textit{GS}}} = P_{\textit{el.k.}} + P_{\textit{GIK}} + BK \quad (48)$$

čia $P_{\textit{el.k.}}$ – elektros energijos kainos dedamoji šilumos gamybos savikainoje, Eur/MWh; $P_{\textit{GIK}}$ – šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje, Eur/MWh; BK – banko paskolos išlaidų dedamoji, Eur/MWh.

$$P_{\text{\textit{GS}}} = 12,89 + 5,15 + 13,05 = 31,09 \textit{ Eur/MWh}$$

Šilumos energijos pardavimo kaina būtų apskaičiuojama:

$$P_{\text{\textit{SP}}} = P_{\text{\textit{GS}}} \cdot 5\% \quad (49)$$

čia $P_{\textit{SKS}}$ – šilumos energijos gamybos savikaina, Eur/MWh

$$P_{\text{\textit{SP}}} = 31,09 \cdot 5\% = 32,64 \textit{ Eur/MWh}$$

Šilumos siurblio jėgainės pelnas būtų:

$$P = (32,64 - 31,09) \cdot 2074,8 = 3215,94 \textit{ Eur}$$

Pastebime, kad pelnas nėra didelis, todėl, kad šilumos siurblio jėgainė realiai dirbtų tik tris mėnesius. Jeigu elektros energiją pasigamintumėme patys pasistatant prie akumuliacinės talpyklos saulės modulius, elektros energija nekainuotų, todėl sumažėtų šilumos siurblio jėgainės šilumos gamybos kaina.

Tuomet jėgainės šilumos energijos gamybos savikaina būtų:

$$P_{\text{\textit{GS2}}} = P_{\textit{GIK}} + BK \quad (50)$$

čia $P_{\textit{GIK}}$ – šilumos gamybos išlaidų ir amortizacijos dedamoji savikainoje, Eur/MWh; BK – banko paskolos išlaidų dedamoji, Eur/MWh.

$$P_{\text{\textit{GS2}}} = 5,15 + 13,05 = 18,2 \textit{ Eur/MWh}$$

Galutinė šilumos siurblio jėgainės šilumos energijos pardavimo kaina būtų:

$$P_{\text{\textit{SP}}} = P_{\text{\textit{GS2}}} \cdot 60\% \quad (51)$$

čia $P_{\text{\textit{GS2}}}$ – šilumos siurblio jėgainės energijos gamybos savikaina, Eur/MWh; 60% – antkainis prie šilumos energijos savikainos.

$$P_{\text{\textit{SP}}} = 18,2 \cdot 1,6 = 29,12 \textit{ Eur/MWh}$$

8.1 Investicijų atsipirkimo skaičiavimas

Investicijų atsipirkimo laikas šilumos siurblio jėgainei būtų apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\textit{Investicijų atsipirkimo laikas } (I_1) = \textit{Investicijos} / \textit{Pardavimo pelnas} \quad (52)$$

$$I_1 = \frac{427500}{22657} = 19 \textit{ m}$$

Jeigu būtų gaunamos papildomos lėšos iš ES, skirtos atsinaujinančių energijos išteklių plėtrai, kurios padengtų 50% investicijų, atsipirkimo laikas sutrumpėtų iki 9 metų:

Investicijų atsipirkimo laikas (I_1) = Investicijos / Pardavimo pelnas

(53)

$$I_2 = \frac{213750}{22657} = 9,4 \text{ m}$$

8.1 lentelė. Šilumos siurblio investicijų atsipirkimo skaičiavimas

Eil. nr.	Ekonominiai rodikliai	Eur/metus
1	Pardavimo pajamos, EUR/metus	60418
2	Šilumos gamybos sąnaudos, Eur/Metus	37761
3	Pardavimo pelnas, EUR/metus	22657
4	Paprastasis investicijų atsipirkimo laikas, metai	9

Išvados

1. Išnagrinėta naujoji technologija leidžia tiek atpiginti akumuliacinę sistemą, kad galima kalbėti apie sezoninį šilumos akumuliaciją nedidelio miestelio šilumos poreikiams visam šildymo sezonui.
2. Be paramos saulės akumuliacinė jėgainė neatsipirktų, tačiau pasinaudojus 50% ES lėšomis bei APVA fondų paramomis, investicijos atsipirktų per 10 metų, o šilumos energiją gaminant šilumos siurblių sistemos atsipirkimas būtų per 9 metus. Tai ilgalaikis projektas, todėl po atsipirkimo yra galimybė sukaupti lėšų tokių projektų plėtrai jau be paramos.
3. Suprojektuotos novatoriškos PIT tipo didelio tūrio akumuliacinės talpyklos eksploatacinis laikotarpis būtų 70 metų, o su nedidelėmis išlaidomis modernizacijai, galėtų būti prailgintas ir dar ilgesniam laikotarpiui. Ilgalaikėje perspektyvoje, šis projektas galėtų būti konkurencingas ir ypač ekologiškas.
4. Tokia šilumos jėgainė žymiai efektyviau dirba su naujos kartos žema–temperatūriniais tinklais, todėl tinka gyvenvietei ar miesteliui po pastatų renovavimo ir šilumos sistemos modernizavimo.
5. Įrengiant saulės kolektorių jėgainę ant PIT akumuliacinės talpyklos su ES fondų parama šilumos energijos pardavimo kaina būtų: 32,02 Eur/MWh, o investicijoms atsipirkus, šilumos kaina būtų dar mažesnė, kas leistų sukaupti lėšų tolimesnių projektų plėtrai be finansinės paramos.

Literatūra

1. Schmidt Dietrich and Kallert Anna. Future low temperature district heating design guidebook. Low temperature district heating for future energy systems [interaktyvus]. Fraunhofer, Germany 2017 [žiūrėta 2019-03-01]. ISBN 3-89999-070-6. Prieiga per: <https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2017/12/IEA-Annex-TS1-Final-Report.pdf>.
2. Holm Christian Christiansen and others. Guidelines for low-temperature district heating [interaktyvus]. Danish Technological Institute, 2014, [žiūrėta 2019-03-03]. Prieiga per: https://www.danskfjernvarme.dk//media/danskfjernvarme/gronenergi/projekter/eudplavtemeratur-fjv/guidelines-for-ltdh-final_rev1.pdf.
3. Benoît Stutz, Nolwenn Le Pierres, Frédéric Kuznik, Kevyn Johannes. Storage of thermal solar energy [interaktyvus]. Grenoble, France, 2016, 407-408p [žiūrėta 2019-03-06]. Prieiga per: ScienceDirect.
4. Schmidt Thomas. Solar district heating guidelines [interaktyvus]. Denmark, 2012. [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/SDH_Guidelines.pdf.
5. Guadalfajara Mateo, Lozano Miguel, Serra M. Luis. Analysis of large thermal energy storage for solar district heating [interaktyvus]. Zaragoza, Spain, 2014, [žiūrėta 2019-04-07]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/265048526_Analysis_of_Large_Thermal_Energy_Storage_for_Solar_District_Heating.
6. Mangold Dirk, Schmidt Thomas, Dohna Antonia, Spah Daniel. Guideline for seasonal thermal energy storage systems in built environment [interaktyvus]. Steinbeis Research Institute for solar and sustainable thermal energy systems, Stuttgart, Germany, 2016. [žiūrėta 2019-04-15]. Prieiga per: http://www.ectp.org/fileadmin/user_upload/documents/E2B/EINSTEIN/einstein-guidelines_stes-tanks-del-38.pdf.
7. Sørensen Per Alex, Schmidt Thomas. Design and construction of large scale heat storages for district heating in Denmark [interaktyvus]. Jyllandsgade Skørping, Denmark 2018. [žiūrėta 2019-04-17]. Prieiga per: http://planenergi.dk/wp-content/uploads/2018/05/Soerensen-and-Schmidt_Design-and-Construction-of-Large-Scale-Heat-Storages-12.03.2018-004.pdf.
8. Nielsen Jan Erik, Battisti Riccardo. Rough calculations of the costs and expected yield from a solar district heating plant [interaktyvus]. Denmark, 2012. [žiūrėta 2019-04-18]. Prieiga per: <https://www.solar-district-heating.eu/en/knowledge-database/>.
9. Meteoronorm programinis paketas, skirtas tiksliai saulės spinduliuotei nustatyti [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-04-20]. Prieiga per: www.meteoronorm.com.
10. Trier Daniel. Different types of collectors, their efficiencies and calculation of energy output described along with the solar collector fluid properties [interaktyvus]. Denmark, 2012. [žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: <https://www.solar-district-heating.eu/en/knowledge-database/>.
11. Nielsen Jan Erik. Procedures for how to give performance guarantees for large collector fields and heat exchangers [interaktyvus]. Denmark, 2012. [žiūrėta 2019-03-25]. Prieiga per: <https://www.solar-district-heating.eu/en/knowledge-database/>.
12. Werke Viessmann. Technical Guide. Solar thermal systems [interaktyvus]. Hanover, Germany, 2008. [žiūrėta 2019-02-01]. Prieiga per: https://www.zonnecollectorinfo.nl/pdf/handboek/handboek_GB.pdf.
13. Jianhua Fan, Junpeng Huang, Angelos Chatzidiakos, Simon Furbo. Experimental and theoretic investigations of thermal behavior of a seasonal water pit heat storage [interaktyvus]. Denmark, 2017. [žiūrėta 2019-02-27]. Prieiga per: <http://orbit.dtu.dk/en/publications/experimental-and-theoretic-investigations-of-thermal-behavior-of-a-seasonal-water-pit-heat-storage>.

14. Naujos kartos termoizoliacinės plokštės, [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-04-14]. Prieiga per: <http://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/83/1/0/1/article/18192/naujos-kartos-termoizoliacines-plokstes>.
15. Stene J. Design and application of ammonia heat pump systems for heating and cooling of non-residential buildings [interaktyvus]. Sintef energy research, Trondheim, Norway, 2008. [žiūrėta 2019-03-15]. Prieiga per: citeseerx.ist.psu.edu/.
16. York. Information from York Refrigeration, Norway, 2008 [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-15]. Prieiga per: citeseerx.ist.psu.edu/.
17. Chan C.W., J. Ling-Chin, A.P. Roskilly. Swan Joseph. Reprint of "A review of chemical heat pumps, thermodynamic cycles and thermal energy storage technologies for low grade heat utilization. [interaktyvus]. Centre for Energy Research, Newcastle University, UK, 2013. 169-171, [žiūrėta 2019-03-15]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/257537695>.
18. Guadalfajara Mateo. Analysis of Large Thermal Energy Storage for Solar District Heating. [interaktyvus]. Universidad de Zaragoza, Spain, 2014. [žiūrėta 2019-04-20]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/265048526_Analysis_of_Large_Thermal_Energy_Storage_for_Solar_District_Heating.
19. Averfalk Hege. Large heat pumps in Swedish district heating systems, [interaktyvus]. Halmstad, Sweden, 2017. [žiūrėta 2019-02-20] Prieiga per: <https://www.researchgate.net>.
20. Mukrimin Sevket, Tepe Yalcin. Classification and assessment of energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [interaktyvus] Turkey, 2017. [žiūrėta 2019-01-14]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>.
21. Šilumos siurblio parinkimas pagal gamintoją [žiūrėta 2019-04-14]. Prieiga per: ps://www.star-ref.co.uk/our-products/neatpump/neatpump-brochure.aspx.